

文章编号 1004-924X(2024)18-2772-11

某型摆式加速度计自动盖总成装配系统

任同群^{1,2}, 吴 晗², 蒋锐锋², 介 迪², 王晓东^{1,2*}

(1. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024;

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 116024)

摘要:摆式加速度计广泛应用于航空航天、船舶等领域的惯性导航系统中,其装配作业目前主要依赖于人工操作,产品一致性难以保证。鉴于此,本文针对某型摆式加速度计研制了一套自动装配系统。基于宏微结合的设计策略,搭建基于高精度运动滑台的微动平台,以及基于单轴机器人的宏动平台。确立了以微动平台为精调核心,以宏动平台辅助压装并实现不同功能模块工作位置调整的装配机制,同时设计功能模块上中下三层的立体分层式结构,在保证精度的同时避免作业空间的拥挤。引入六轴协作机器人并集成视觉系统,实现作业空间的全覆盖识别和自动化上下料功能。针对磁钢零件磁性力对装配精度的影响,采用零件内部辅助限位的方式,实现零件装配精度的保持。基于刚体变换,对系统进行误差分析并推导了误差补偿模型。实验结果验证,该装配系统的角度装配精度优于 $\pm 0.03^\circ$,压装力精度优于 $\pm 0.5\text{ N}$,扭力精度优于 $\pm 0.003\text{ N}\cdot\text{m}$,满足装配要求,为该型摆式加速度计的批量化生产提供了有力保障。

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243218.2772

Automatic cover assembly system for a certain type of pendulum accelerometer

REN Tongqun^{1,2}, WU Han², JIANG Ruifeng², JIE Di², WANG Xiaodong^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

Abstract: Pendulum accelerometer is widely used in inertial navigation systems of aerospace, shipping and other fields. Its assembly operation currently relies mainly on manual operation, making it difficult to ensure product consistency. In view of this, this article has developed an automatic assembly system for a certain type of pendulum accelerometer. Based on the design strategy of macro-micro combination, a micro-motion platform based on a high-precision motion slide table and a macro-motion platform based on a single-axis robot were built. A assembly mechanism was established with the micro-motion platform as the precision adjustment core and the macro-motion platform assisting in pressing and realizing the adjustment of the working positions of different functional modules. At the same time, a three-layer stacked ver-

收稿日期: 2024-05-14; 修订日期: 2024-06-07.

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目资助(No. XLYC2002020); 国家部委基础预研重大项目资助(No. JCYK2016205A003)

tical layered structure was designed for the functional modules to ensure precision while avoiding congestion in the workspace. A six-axis collaborative robot and an integrated vision system were introduced to achieve full-coverage recognition and automatic loading and unloading functions in the workspace. Aiming at the influence of magnetic force of magnetic steel parts on assembly accuracy, the method of auxiliary limiting inside the parts was adopted to maintain the assembly accuracy of parts. Based on rigid body transformation, error analysis of the system is carried out and an error compensation model was derived. Experimental results verify that the angle assembly accuracy of the assembly system is better than $\pm 0.03^\circ$, the pressing force accuracy is better than $\pm 0.5\text{ N}$, and the torque accuracy is better than $\pm 0.003\text{ N}\cdot\text{m}$, meeting the assembly requirements and providing strong support for the mass production of this type of pendulum accelerometer.

Key words: micro assembly; pendulum accelerometer; assembly system; error analysis

1 引 言

摆式加速度计因具有精度高、量程大、结构简单、技术成熟、经济性表现优异等特点,被广泛应用于航空航天、船舶等领域的惯性导航系统中^[1-3]。其盖总成装配工艺涉及点胶、装调、压装和锁付等步骤,实现自动化较为困难。导致目前装配作业主要依赖于人工操作,这不仅使得产品一致性难以保证,还限制了生产效率的提升。因此,研究开发自动化装配系统来保证摆式加速度计零件的总成装配精度,提高零件装配的一致性,对促进其规模化生产具有重要意义。

作为典型的微小器件装配任务,摆式加速度计盖总成装配涉及点胶、装配、压装和锁付等操作,这些操作集中于零件底座相对狭小的空间内,这导致了复杂装配工艺与有限装配空间之间的矛盾。针对此类问题,一种解决方案是设计开发一种高度集成的多自由度装配系统^[4]。刑登鹏等人研制了一种多机械手微装配系统^[5-8],该系统围绕零件作业空间呈放射状布置了6个机械手和3个视觉模块,解决了多种零件并行操作装配的难题。这种方法不可避免地形成自由度冗余,对装配系统控制、装配流程设计、装配系统结构布置等提出较高要求。另一种解决方案是开发多工位的装配系统,将装配任务分配给多个工位执行,解决装配空间过于紧凑的问题^[9]。Zang等人研制了一种空间推进系统的电动阀自动装配生产线^[10],包含第一送料工作站、第二送料工作站、装载焊接工作站和测量测试工作站这四个工作站,通过机械臂实现工作站之间的移料,并由专

用夹紧机构限位夹紧零件。这种办法可以提高整个装配系统的稳定性,降低设计、控制难度,有利于大批量、高效率生产,但是多工位的装配系统不利于装配过程中零件的精度保持,往往需要设计专用的工装夹具或者零件自身增加相应的限位结构,来保证零件在各个工位之间流转时装配精度不被破坏。

摆式加速度计盖总成装配任务中,要求自动化的批量装配操作,存在较大范围的上料区,势必引入多工位大范围的零件分布与高精度零件识别之间的矛盾。针对此类问题,一种办法是通过多个视觉模块实现大范围的零件识别。中国科学院自动化研究所研制了一种自动装配系统^[11-12],该装配系统中通过机器人末端搭载的普通相机,完成上料平台处的零件识别任务,另设两个显微相机安装在高精度位移平台上,实现装配平台处高精度识别任务。这种办法将宏微识别任务分离,同时兼顾了多工位和高精度的识别,识别测量稳定性高,但是硬件繁多、结构复杂。另一种办法是通过中间介质或者复合其他功能模块实现零件大范围的测量识别^[13-15]。大连理工大学研制了一种悬丝摆式加速度计摆组件自动装配系统^[16-17],装配过程中采用“单相机+反射棱镜”的测量方式,实现零件三维空间的位姿信息的测量。徐征等人基于无限远成像原理研制了一种宏微视觉单元^[18],通过调配后端的镜筒透镜达到单物镜双通道变倍成像的功能,实现了显微视觉高分辨率和大视野并行成像功能。这种图像识别的方法较为复杂,对于整个视觉系统的安装调试以及系统标定提出较高的要求。

磁钢零件是摆式加速度计的关键组成部分,在装配过程中,磁钢的磁性会造成对金属零件的吸引,增加了装配过程的不确定性。针对此类问题,可以开发集成微型夹持器^[19-20]或者开发专用夹具,对装配的零件进行固定限位,保持其装配精度。Jaeyoul Lee 等人研制了一种旋转传感器装配夹具^[21],该夹具集成了 7 个夹指和 3 个转轴,通过组装夹具机构对零件的多方向移动和转动,实现传感器的调整装配。以上方法虽然可以实现零件的固定限位,但是在该装配系统中磁钢与两侧套筒之间最小距离不足 1 mm,限位机构自身布置集成和操作困难,并且其复杂的结构会进一步地挤占有限的装配作业空间,影响后续装配作业。

本文针对某型摆式加速度计研制了一套自动盖总成装配系统,综合应用高度集成与多工位的结构布置方式,解决有限作业空间下多功能模块布置集成的问题。采用协作机器人集成视觉系统,实现全装配操作空间的视觉识别功能。采用辅助定位的方式,避免磁钢零件磁性力对装配精度的影响。

2 装配系统总体方案

2.1 装配任务

本文加计盖总成需要装配的零件主要包括:底座、套筒、上盖、销钉、螺钉,如图 1 所示,其中摆组件和磁钢已在前序任务中装配完成。装配任务需要将上盖装配在底座上,这两个零件之间通过两个套筒支撑,并且上盖的一端由过盈压装的销钉限位,另一端通过螺钉锁紧,需要注意的是销钉和底座之间过盈压装并胶粘连接。零件装配完成后俯视范围小于 15~35 mm。其中,装配任务要求上盖边线与底座上的基准凸台边线平行,角度偏差 $\leq \pm 0.1^\circ$;压装力范围 ≤ 30 N,施力精度 $\leq \pm 0.5$ N;螺钉拧紧力矩要求 $(0.1 \pm 5\%)$ N·m。

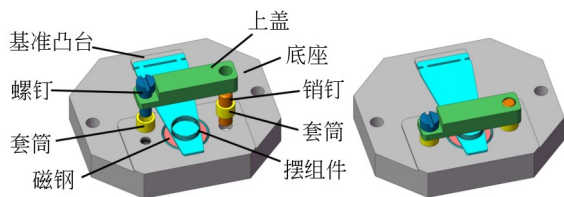


图 1 待装配零件和装配后零件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parts to be assembled

2.2 总体结构

由装配任务可知,本文加计盖总成装配涉及过盈压装、螺钉锁付、点胶等多个工艺,且装配操作都集中在底座零件上的狭小空间,切实存在复杂装配工艺与有限装配空间的矛盾。考虑到磁钢磁性对精度保持的不利影响,该系统作业主体部分采用高度集成单工位的结构形式。过盈压装与螺钉锁付的主运动方向为 Z 向,负载要求大且精度由力(矩)传感器控制,故将二者集成,构成压装和锁付模块,主要考虑模块的负载能力。装配作业时零件拾取与点胶操作的主运动方向也为 Z 向,但负载较轻且精度要求不高,故将二者集成,构成点胶和拾取模块。为完成装配任务,零件需要高精度的位姿调整能力,故设置作业工作台模块,要求其具备 X, Y, Z 向的位置以及绕 Z 向的姿态高精度调整能力。将上述功能模块设计为上中下的空间布局,一方面减小系统平面内的占用空间,另一方面分别赋予压装和锁付模块、点胶和零件拾取模块独立的 Y 向自由度,使其能够实现平面内的空间避让,以有效应对操作空间狭小的问题。

为实现批量自动化装配,设计了大面积的独立上料工位以及由协作机器人为主体的上下料机构。为了同时兼顾上下料工位和作业操作工位多位姿的零件视觉识别任务,将相机集成在协作机器人末端,构成视觉和自动上下料模块。这种手眼一体的设计思路,间接扩大了视觉检测的范围,而且简化了结构,能够有效解决多工位大范围的零件分布与高精度零件识别之间的矛盾。

销钉侧套筒装配时销钉已经装配完成,有销钉的限位存在,磁钢磁性力对其产生的翻转力矩不会造成套筒干扰甚至损坏摆组件的问题。而螺钉侧的套筒装配时,螺钉并未装配,若无限制措施,则前述影响不可避免。为此,设计与销钉类似的辅助销,上盖装配完成后,先拔除辅助销再进行螺钉锁付。受上盖的限制,翻转力矩对螺钉侧套筒不起作用。该措施不增加冗余结构,也不增加新的装配工艺,能够简捷有效地消除磁钢磁性给装配过程带来的不确定性。

综上,该自动装配系统主体结构如图 2 所示。各功能模块协同配合,共同完成加速度计零件的装配任务。

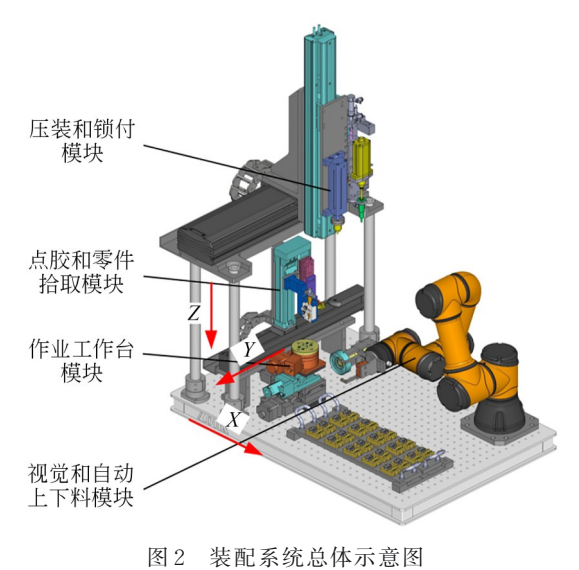


Fig. 2 Overall schematic diagram of packaging system

2.3 视觉和自动上下料模块

在视觉和自动上下料模块中,将视觉检测与上下料功能集成,使得全装配流程共用同一视觉系统,并由六轴协作机器人驱动,如图3所示,主要由六轴协作机器人、视觉系统、气动夹爪、料盘和零件夹具组成。六轴协作机器人安装在光学平台上,其末端安装有视觉系统和气动夹爪。此时,视觉系统不仅实现了上料前零件夹具位置的识别,还实现了在装配过程中对待装配零件位置的识别。设计统一的专用夹具和有固定限位的料盘,提高零件上料位置的重复性,气动夹爪在

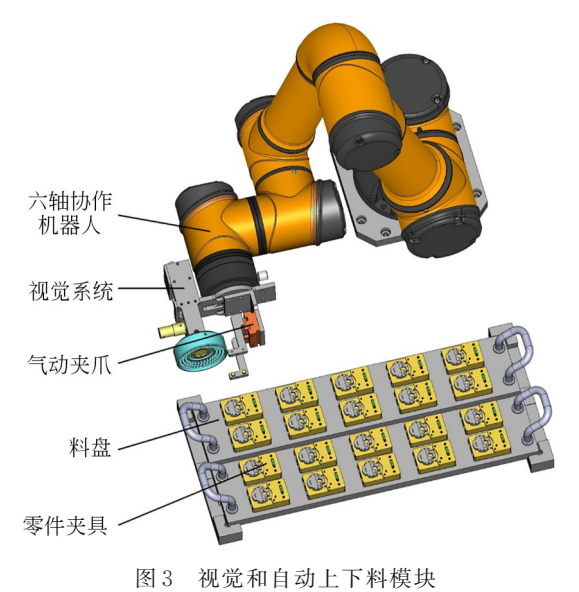


Fig. 3 Visual and automatic feeding and blanking module

六轴协作机器人驱动下,实现零件的可靠抓取。专用夹具结构如图4所示,其上加工有零件放置孔,并且安装有销钉,实现零件在空间内的限位,便于夹爪或吸嘴取料,同时,调整间距避免取料过程的干涉。为避免磁钢零件磁性力对装配精度的影响,在夹具上增加辅助销,辅助销与底座螺孔先行装配,从内侧对后装的套筒进行限位,直至上盖压装完成后,撤出辅助销再进行螺钉锁付。

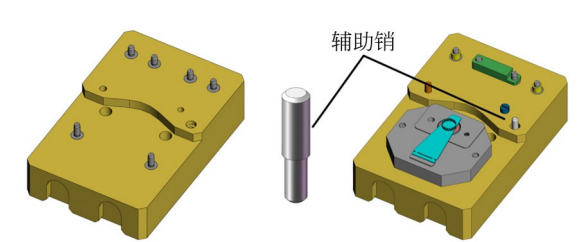


Fig. 4 Part fixture and auxiliary pin

2.4 作业工作台模块

作业工作台模块是实现高精度装调的核心模块。协作机器人完成上料后,作业工作台模块基于视觉检测实现底座零件位姿的精确调整,而后协同其他功能模块完成装配。

如图5所示,作业工作台模块主要由三轴精密位移滑台、精密转台、吸盘和销钉组成。三轴精密位移滑台安装在光学平台上,其上叠装有精密转台,形成一个四自由度高精度微动平台,而精密转台表面安装有销钉和吸盘,分别用于零件夹具的限位和固定。其中,实现吸附固定功能的气路安装在精密转台内部,通过转接板引出。

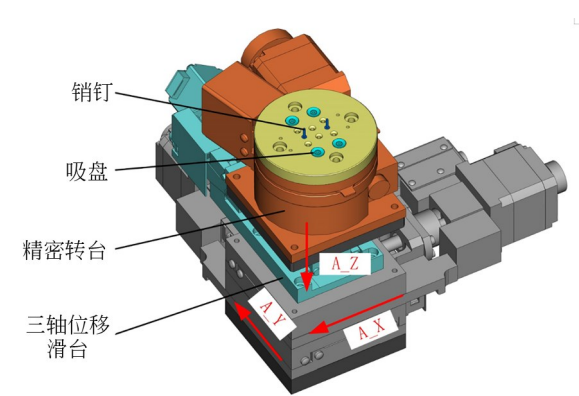


Fig. 5 Operating workbench module

2.5 点胶和零件拾取模块

作业工作台模块完成底座零件位姿精确调整后,点胶和零件拾取模块动作,完成点胶及其他零件的顺序拾取,配合压装和锁付模块完成最终装配。

如图 6 所示,点胶和零件拾取模块主要包含:Y 向单轴机器人、Z 向单轴机器人、点胶机构、气动滑台和气动夹爪。Y、Z 向单轴机器人组合形成一个二自由度宏动平台,安装在光学平台上,Z 向单轴机器人安装有点胶机构和气动夹爪。为了避免装配过程中的干涉,单轴机器人和气动夹爪之间安装有气动滑台,通过气动滑台给予气动夹爪在竖直方向上附加的运动行程。

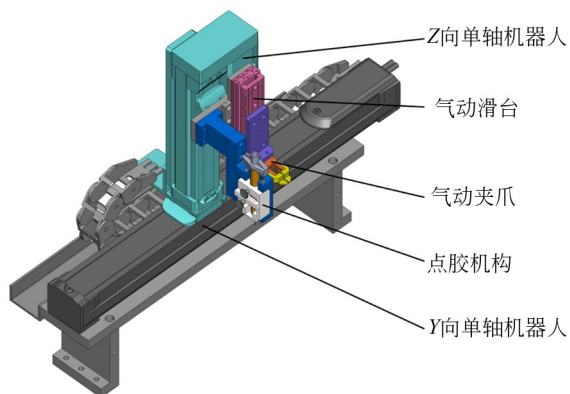


图 6 点胶和零件拾取模块

Fig. 6 Glue dispensing and parts picking module

2.6 压装和锁付模块

压装和锁付模块提供零件压装功能和螺钉锁付功能。前述两模块完成底座零件位姿精确调整以及待装配零件拾取后,压装和锁付模块动作以完成最终装配。

如图 7 所示,压装和锁付模块主要包含:Y 向单轴机器人、Z 向单轴机器人、倍力气缸、压力传感器、锁付机构等。Y、Z 向单轴机器人组合形成一个二自由度宏动平台,安装在光学平台上,Z 向单轴机器人上分别安装有压装机构和螺钉锁付机构。其中,压装动作由倍力气缸实现,再由压力传感器进行压装力的反馈检测实现闭环控制。锁付机构采用吸附式取料,可实现螺钉锁付、螺钉退松、分步拧紧、扭矩控制、浮高与滑丝检测等功能。如图 8 所示,锁付机构顶部安装有气缸,中部竖直向下安装有直线导轨,直线导轨上有两个

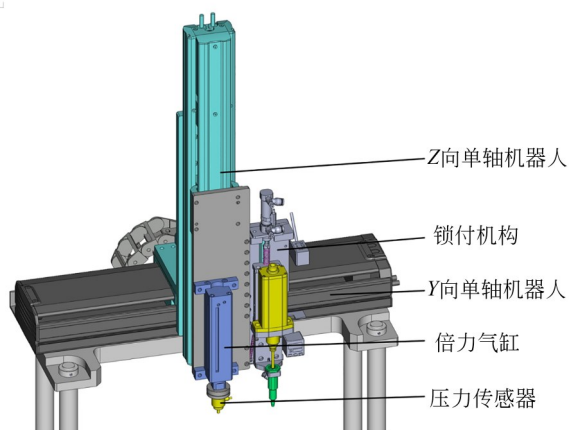


图 7 压装和锁付模块

Fig. 7 Pressing and locking module

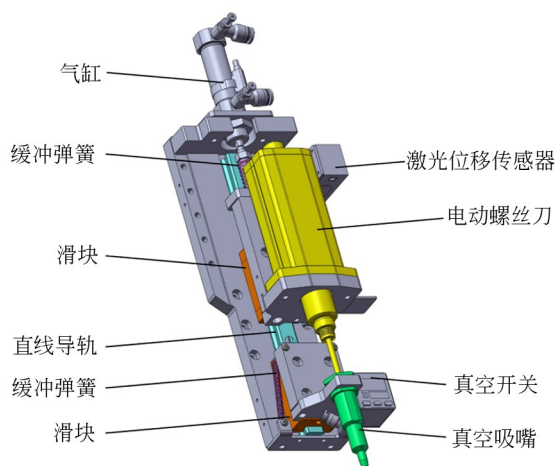


图 8 锁付机构

Fig. 8 Locking mechanism

滑块,上方的滑块上安装电动螺丝刀,并且与气缸的顶杆之间通过缓冲弹簧等结构进行浮动连接,下方的滑块上安装真空吸嘴,并且它与底座之间有缓冲弹簧连接。该结构实现了对电动螺丝刀和真空吸嘴运动的直线导向,同时实现了锁付动作的缓冲。

2.7 装配流程

零件的装配流程可以顺序概括为:零件上料、底座点胶、销钉压装、套筒 1 装配、辅助销装配、套筒 2 装配、上盖压装、辅助销移除、螺钉锁付和零件下料这十个部分。其中,各部分装配流程有较大的相似性,这里以销钉压装为例详细阐述。

销钉压装流程主要包括销钉一次识别、销钉

抓取、销孔识别、销钉二次识别和销钉压装这五个步骤。如图 9 所示,完成前序的零件上料和销孔点胶流程后,销钉压装流程如下:

(1)销钉一次识别:视觉系统与作业工作台模块协同运动至合适位置,对销钉进行识别,获得抓取位置,完成销钉一次识别。

(2)销钉抓取:点胶和零件拾取模块与作业工作台模块协同运动,调整销钉与夹爪的位置,完成零件抓取,然后气动夹爪夹持销钉移动到安全位置,避免遮挡后续视觉系统的识别过程。

(3)销孔识别:视觉系统与作业工作台模块协同运动至合适位置,对销孔进行识别。

(4)销钉二次识别:视觉系统与点胶和零件拾取模块协同运动至合适位置,进行销钉二次识别,获取抓取之后的销钉实际位置。

(5)销钉压装:作业工作台模块调整销孔相对于销钉的位置,使销钉与销孔对齐,然后压装和锁付模块运动到销钉上方,倍力气缸动作,Z向单轴机器人向下运动进行销钉压装,气动夹爪配合同步运动,压装力由力传感器进行反馈。达到要求压装力后,并且各个模块恢复初始状态。

在销钉压装中,销钉第一次识别仅作为气动夹爪抓取使用,销钉第二次识别作为销钉和销孔相对位置调整使用,通过两次销钉的识别流程,避免气动夹爪抓取零件后,零件的位置变动引起的误差。在相机位置姿态不变的情况下,先后完成销孔和销钉的位置识别,避免相机姿态变化引入误差。

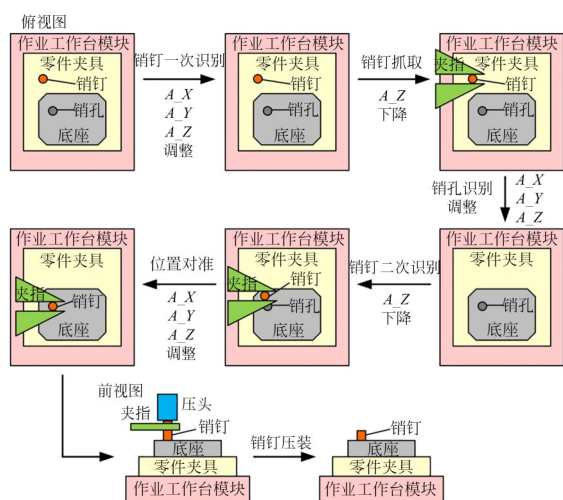


图 9 销钉压装流程

Fig. 9 Pin pressing process

3 分析与实验

3.1 误差分析与补偿

本设备采用的是“先看后动”的视觉引导控制:通过相机拍照识别零件相对位置,再用精密滑台进行位置调整。在该装配系统的精细作业中,视觉系统位置固定不动,仅由作业工作台模块移动零件,一次性获取零件相对位置信息。其中,作业工作台中的XY轴位移滑台分辨率 $1\ \mu\text{m}$,重复定位精度 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$,Z轴分辨率 $0.5\ \mu\text{m}$,重复定位精度 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ 。位移滑台自身精度满足装配要求,但是在装配过程中,各位移滑台的安装存在偏差、导轨安装的结构件存在加工误差。以相机坐标轴与作业装配坐标轴安装偏角为例,该偏角会导致精密滑台移动的距离与相机实测距离不符,致使最终影响装配作业结果。所以有必要建立相应的误差分析模型并进行误差补偿。

本系统在精细作业中,涉及四个坐标系,分别是:图像坐标系 O_p-uv 、世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 、作业工作台坐标系 $O_a-x_a y_a z_a$ 和视觉坐标系 $O_v-x_v y_v z_v$,如图 10 所示。在前文装配流程中,需要由视觉系统识别待装配零件的相对位置,再由作业工作台模块的滑台进行位置调整。所以从本质上来讲,装配流程是一个从像素坐标系 O_p-uv 到

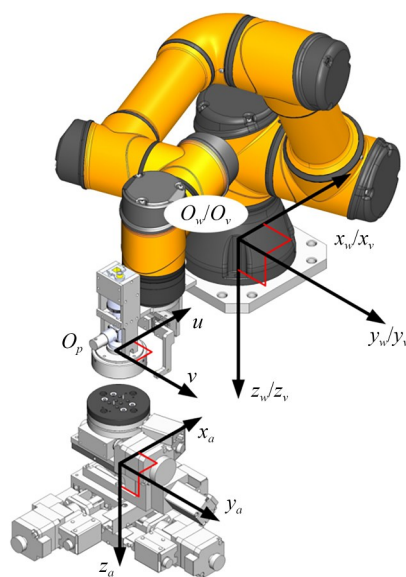


图 10 建立空间坐标系

Fig. 10 Establishment of space coordinate system

作业工作台坐标系 $O_a-x_a y_a z_a$ 的几何映射。

本文设置世界坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 与视觉坐标系 $O_v-x_v y_v z_v$ 重合; x_a 与 A_X 轴重合, A_Y 位于 $O_a-x_a y_a$ 平面内, 其中, $\{A_X, A_Y, A_Z\}$ 为作业工作台模块各滑台实际运动轴。

在世界坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 下零件装配所需相对位移 $\{\Delta X_w, \Delta Y_w, \Delta Z_w\}$ 主要包括三个部分: (1) 在零件相对位置识别时, 由作业工作台模块滑台移动量 $\{\Delta A_X_1, \Delta A_Y_1, \Delta A_Z_1\}$ 引起的 $\{\Delta X_{w1}, \Delta Y_{w1}, \Delta Z_{w1}\}$; (2) 由视觉系统像素坐标差 $\{\Delta U, \Delta V\}$ 测得的 $\{\Delta X_{w2}, \Delta Y_{w2}, 0\}$; (3) 零件完成装配高度方向所需移动量 $\{0, 0, \Delta Z_{w3}\}$ 。其中作业工作台模块滑台实际运动量 $\{\Delta A_X_1, \Delta A_Y_1, \Delta A_Z_1\}$ 可通过作业工作台模块驱动器直接读出; $\{\Delta U, \Delta V\}$ 是通过图像处理获得; $\{\Delta Z_{w3}\}$ 是零件装配在高度方向所需的移动量, 可示教获得。

由于相机安装误差, 图像坐标系 O_p-uv 与世界坐标系 $O_w-x_w y_w z_w$ 之间存在夹角 α_1 , 如图 11 所示。基于刚体变换, $\{\Delta X_{w2}, \Delta Y_{w2}, 0\}$ 可由式 (1) 给出:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{w2} \\ \Delta Y_{w2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \times P_x \\ \Delta V \times P_y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: α_1 为 u 轴与 x_w 轴的偏转角, (P_x, P_y) 为像素当量。

将作业工作台模块的运动分解为两个部分, 一个是在 $O_a-x_a y_a$ 平面内的运动, 如图 12 所示, 则

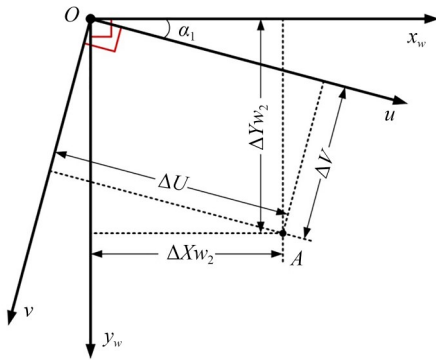


图 11 坐标系 O_p-uv 与坐标系 $O_w-x_w y_w$ 转换关系

Fig. 11 Conversion relationship between O_p-uv and $O_w-x_w y_w$

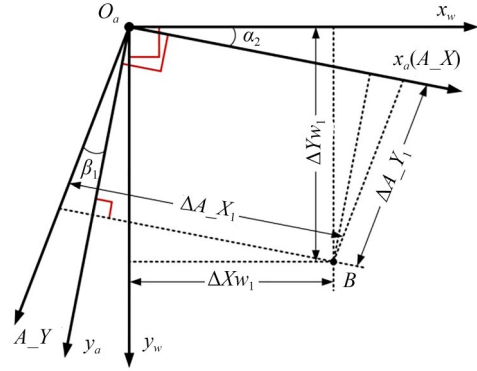


图 12 坐标系 $O_a-x_a y_a$ 与坐标系 $O_w-x_w y_w$ 水平转换关系

Fig. 12 Conversion relationship between $O_a-x_a y_a$ and $O_w-x_w y_w$

作业工作台坐标系 $x_a (A_X)$ 轴与世界坐标系 x_w 轴之间存在夹角 α_2 , 滑台实际运动方向 A_Y 轴与作业工作台坐标系 y_a 轴之间存在夹角 β_1 , 所以世界坐标系中 $\{\Delta X_{w1}, \Delta Y_{w1}\}$ 与滑台运动量 $\{\Delta A_X_1, \Delta A_Y_1\}$ 之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta A_{X1} \\ \Delta A_{Y1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \beta_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \beta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{w1} \\ \Delta Y_{w1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

另一个是滑台在 O_a-z_a 轴方向运动, 如图 13 所示, 滑台实际运动方向 A_Z 轴与作业工作台坐标系 z_a 轴之间存在夹角 γ_1 , 使得 z_a 方向的运动会在 x_a 和 y_a 方向产生偏移, 需要进行补偿, 所以世

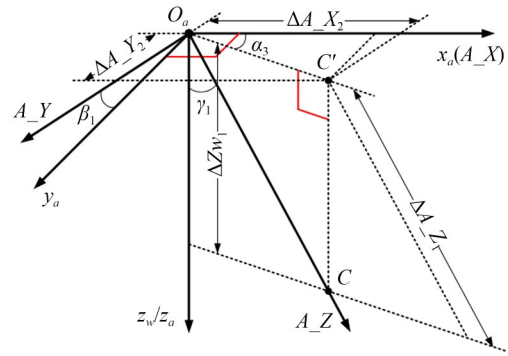


图 13 坐标系 O_w-z_w 与坐标系 $O_a-x_a y_a z_a$ 竖直转换关系

Fig. 13 Conversion relationship between O_w-z_w and $O_a-x_a y_a z_a$

界坐标系中 $\{\Delta Z_{w1}\}$ 与滑台运动量 $\{\Delta A_X_2, \Delta A_Y_2, \Delta A_Z_1\}$ 之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta A_X_2 \\ \Delta A_Y_2 \\ \Delta A_Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\tan \gamma_1 \cos \alpha_3 - \tan \beta_1 \tan \gamma_1 \sin \alpha_3 \\ 0 & 1 & -\frac{\tan \gamma_1 \sin \alpha_3}{\cos \beta_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos \gamma_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Z_{w1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, α_3 是 x_a 轴线和 A_Z 轴线的偏转角在坐标平面 $O_a-x_a y_a$ 中的投影。

综合式(1)~式(3)可知,世界坐标系中的位

移 $\{\Delta X_w, \Delta Y_w, \Delta Z_w\}$ 与作业工作台模块滑台实际运动 $\{\Delta A_X, \Delta A_Y, \Delta A_Z\}$ 之间的转换模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta A_X \\ \Delta A_Y \\ \Delta A_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \beta_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \beta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \times P_x \\ \Delta V \times P_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\tan \gamma_1 \cos \alpha_3 - \tan \beta_1 \tan \gamma_1 \sin \alpha_3 \\ 0 & 1 & -\frac{\tan \gamma_1 \sin \alpha_3}{\cos \beta_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\cos \gamma_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Z_{w3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta A_X_1 \\ \Delta A_Y_1 \\ \Delta A_Z_1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由上述误差分析模型,需要对安装参数进行标定补偿,具体标定方法见参考文献[22]。

标定结果如表 1 所示。

表 1 安装偏差角度的标定结果

Tab. 1 Calibration results of installation deviation angle

参数	α_1	α_2	α_3	β_1	γ_1
值(8)	-0.117	-0.068	-90.268	-0.292	0.232

3.2 装配实验

根据装配任务要求,装配结果的评价标准为上盖侧边线与底座上的基准凸台边线的夹角、压装力和拧紧力矩的精度。摆式加速度计的装配系统实物如图 14 所示,在此基础上进行了 8 组装配实验。装配任务重点关注压装力和螺钉的锁紧力矩,以及上盖零件侧边线与底座零件上基准凸台边线之间的角度。

在压装力测试中,采用校准后的电子秤进行压装力测试,设定压装力大小为 30 N 进行 8 次测试,测试结果如图 15 所示。

在锁紧力矩的测试中,采用思达 DI-9M-8 扭力测试仪进行锁紧力矩测试,设定锁紧力矩 0.1 N·m 进行 8 次测试,测试结果如图 16 所示。

实装后,采用相机拍照后进行图像处理测量

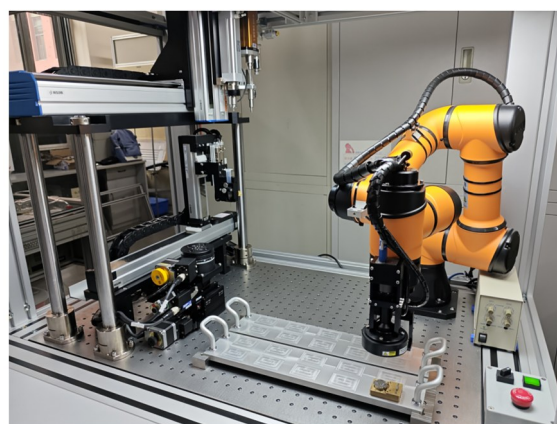


图 14 装配系统实物图

Fig. 14 Physical diagram of packaging system

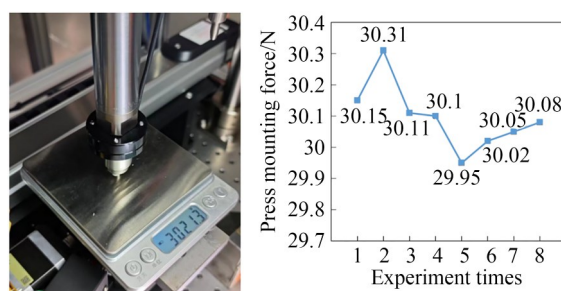


图 15 压力测试结果

Fig. 15 Stress test results

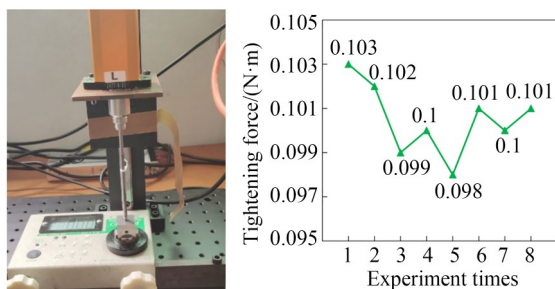


图 16 拧紧力测试结果

Fig. 16 Tightening force test results

上盖侧边线与底座零件上基准凸台边线角度,如图 17 所示,8 次实验结果如图 18 所示。

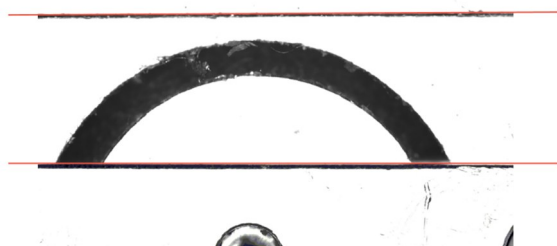


图 17 上盖装配角度测量

Fig. 17 Measurement of upper cover assembly angle

实验结果表明,该装配系统角度装配精度优于 $\pm 0.03^\circ$ 的装配精度,压装力精度优于 ± 0.5 N,扭力精度优于 ± 0.003 N·m,满足摆式加速度计的装配要求。

4 结 论

本文针对某型摆式加速度计人工装配产品一致性差的问题,研制了一种摆式加速度计自动装配系统。将作业空间划分为上下料工作位置

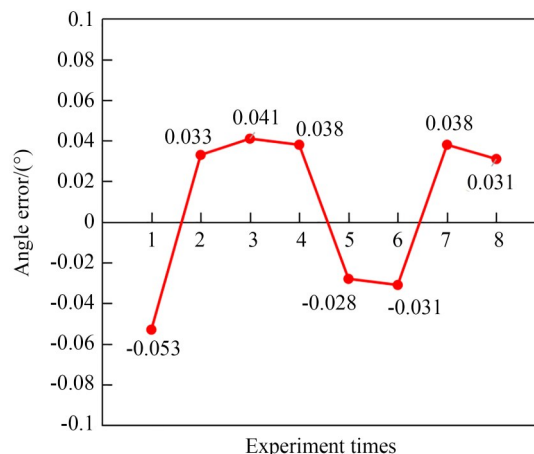


图 18 上盖装配角度误差测量结果

Fig. 18 Measurement of the angle error of the assembly cover

与装调作业工作位置。在上下料工作位置中,采用协作机器人搭载视觉系统,实现装配作业空间的全覆盖识别和自动上下料功能。在装调作业工作位置中,设计搭建独立的高精度微动平台,并采用单轴机器人构建大运动范围的宏动平台。从空间布局上,将各功能模块集成设计为上中下三层的立体分层式结构,实现有限作业空间下,多种装配功能的有序协同作业。此外,增加辅助销,从零件内部限位,在狭小作业空间的情况下,避免了磁钢零件磁性力对装配精度的影响。

通过该型摆式加速度计自动装配系统进行了装配实验,实验结果表明:该装配系统角度装配精度优于 $\pm 0.03^\circ$,压装力精度优于 ± 0.5 N,扭力精度优于 ± 0.003 N·m。因此本文研制的装配系统满足该型摆式加速度计零件的装配精度要求。

参考文献:

- [1] ZHANG C X, DAI M P, LUO W, *et al.* High precision tri-axial quartz flexible accelerometers resolution measurement method based on tri-axial turntable [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 53463-53470.
- [2] WANG C, LI X F, KOU K, *et al.* Analytical model of magnetic field distribution in the air-gap of quartz flexible accelerometer[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*,

2016, 50(3): 367-377.

- [3] 张世磊, 于梦溪, 时旷怡, 等. 基于石英挠性加速度计的微重力测量系统设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2021, 29(6): 821-826.
- ZHANG S L, YU M X, SHI K Y, *et al.* Design of microgravity measurement system based on quartz flexible accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(6): 821-826. (in Chinese)

- [4] SHAO C, ZHANG Z J, YE X, *et al.* Modular design and optimization for intelligent assembly system [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 76: 67-72.
- [5] XING D P, XU D, LI H P. A sequence of micro-assembly for irregular objects based on a multiple manipulator platform[C]. 2014 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, IL, USA. IEEE, 2014: 761-766.
- [6] 李海鹏, 邢登鹏, 张正涛, 等. 宏微结合的多机械手微装配机器人系统[J]. 机器人, 2015, 37(1): 35-42.
- LI H P, XING D P, ZHANG Z T, *et al.* Micro-assembly robot system with multiple manipulators based on macro-micro motion mechanism [J]. *Robot*, 2015, 37(1): 35-42. (in Chinese)
- [7] LIU S, XU D, ZHANG D P, *et al.* High precision automatic assembly based on microscopic vision and force information [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13 (1) : 382-393.
- [8] XING D P, XU D, LIU F F. Collision detection for blocking cylindrical objects [C]. 2015 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Hamburg, Germany. IEEE, 2015: 4798-4803.
- [9] 张朝, 徐志鹏, 曹松晓, 等. 基于工业机器人与机器视觉的多路阀自动装配[J]. 现代制造工程, 2022(6): 122-127, 48.
- ZHANG C /Z), XU Z P, CAO S X, *et al.* Automatic assembly of multi-way valve based on industrial robot and machine vision [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(6): 122-127, 48. (in Chinese)
- [10] ZANG X H, ZENG Z Q, PAN M Q, *et al.* Design method for automatic assembly production line of electric valves in space propulsion systems [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(16): 9253.
- [11] MA Y Q, DU K, ZHOU D F, *et al.* Automatic precision robot assembly system with microscopic vision and force sensor [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16 (3) : 172988141985161.
- [12] MA Y Q, LIU X L, ZHANG J, *et al.* Robotic grasping and alignment for small size components assembly based on visual servoing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11): 4827-4843.
- [13] SHAO C, YE X, QIAN J H, *et al.* Robotic precision assembly system for microstructures [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2020, 234(8): 948-958.
- [14] GUO P Y, ZHANG Z J, LIU Y, *et al.* Precision assembly method based on coaxial alignment and force control [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1303(1): 012152.
- [15] 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 Z 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)
- [16] 任同群, 钱志龙, 徐龙, 等. 悬丝摆式加速度计摆组件自动装配系统 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (7): 1609-1619.
- REN T Q, QIAN Z L, XU L, *et al.* Automatic assembly system for pendulum components of wire suspended pendulum accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (7) : 1609-1619. (in Chinese)
- [17] 李伟, 任同群, 钱志龙, 等. 加速度计惯性组件装配设备的控制策略及软件实现 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(4): 4-7, 47.
- LI W, REN T Q, QIAN Z L, *et al.* Control strategy and software implementation of inertial components assembly equipment [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49 (4) : 4-7, 47. (in Chinese)
- [18] 徐征, 杜宏宇, 杨一帆, 等. 面向复杂微装配的宏微视觉单元 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43(3): 88-91.
- XU Z, DU H Y, YANG Y F, *et al.* Macro and micro vision unit for complicated microassembly [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(3): 88-91. (in Chinese)
- [19] CHEN F X, GAO Y Z, DONG W, *et al.* Design and control of a passive compliant piezo-actuated micro-gripper with hybrid flexure hinges [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68 (11): 11168-11177.
- [20] PARK J, MOON W. A hybrid-type micro-gripper with an integrated force sensor [J]. *Microsystem Technologies*, 2003, 9(8): 511-519.
- [21] LEE J, PARK I, PARK Y, *et al.* Development

- of precision assembly jig for rotational sensor having 21bit class resolution[C]. 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Jeju, Korea (South). IEEE, 2013: 661-662.
- [22] 张建昆. 微小组件精密装配设备夹具设计与标定方法[D]. 大连:大连理工大学,2023..
- ZHANG J K. *Design and Calibration Method of Fixture For Precision Assembly Equipment of Micro Components*[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2023(in Chinese).
- [23] 张建昆,唐大林,任同群,等. 精密摆组件装配设备自标定方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 228-233, 244.
- ZHANG J K, TANG D L, REN T Q, *et al.* Self-calibration method of precision pendulum assembly equipment[J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(7): 228-233, 244. (in Chinese)

作者简介:



任同群(1980—),男,辽宁大连人,博士,副教授,硕士生导师,2002年、2005年和2008年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事计算机视觉、精密工程、微装配技术与系统研究。E-mail: ren_tq@dlut.edu.cn



吴 晗(1995—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,2018年于大连工业大学获得学士学位,主要从事微装配技术与系统研究。E-mail: wuhan@mail.dlut.edu.cn