多零件轴孔精密过盈装配

罗 怡[1], 王东辉[2], 王晓东[1], 张 涛[1], 王密信[1], 严 卫[2]

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 116024 辽宁 大连;
2. 中国航空工业集团公司 西安飞行自动控制研究所, 710065 西安)

摘 要: 为了实现多圆环零件的高精度轴孔过盈配合装配,研制了基于力传感器、光栅尺和工业内窥镜的精密装配及检测系统.设计了柔顺夹持机构,克服了被装配零件与模具装配孔之间的径向定位偏差所引起装配卡阻,提出了装配力/刚度位置补偿方法,在被装配零件外径有 10 μm 制造公差的情况下实现了精确定位.对狭小无照明空间内零件的在线检测,应用内窥镜解耦视觉检测方法,通过控制内窥镜移动的光栅尺的位置信息和采集到的图像信息获得被装配环片的精确位置信息.装配和检测实验表明:圆环零件装配的误差在 -9.4 ~ 6.1 μm 之间,内窥镜检测的不确定度在 -1.7 ~ 8.2 μm 之间.所研制的系统能够满足圆环类零件的精密装配及检测要求.

关键词: 轴孔过盈装配;内窥镜检测;精密装配;装配力/刚度位置补偿;柔顺夹持
中图分类号: TH -39 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 -6234(2013)02 -0111 -06

Multi-peg-hole precision assembly based on interference fit

LUO Yi[1], WANG Donghui[2], WANG Xiaodong[1], ZHANG Tao[1], WANG Mixin[1], YAN Wei[2]

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China; 2. Xi'an Aviation Automatic Control Institute, Aviation Industry Corporation of China, 710065 Xi'an, China)

Abstract: A precise assembly and measurement system was developed and fabricated for multi-peg-holes assemble based on interference fit, in which a compliant gripping mechanism was designed to avoid the assembly jam, the force/stiffness position compensation was proposed to eliminate the fabrication tolerance deflection of 10 μm, and the ring components were precisely positioned in the assembly mold. Borescope decouple vision measurement was proposed to measure the position of assembled components in narrow and dark environment. The position information of assembled components was measured combining the information of captured image and grating rule which assembled on the linear guide driving the borescope. The experimental results show that using the developed system, the position errors of assembly were from -9.4 to 6.1 μm and the measurement errors were from -1.7 to 8.2 μm, it could meet the requirement of the precise assembly and measurement.

Key words: peg-hole interference fitting assembly; borescope measurement; precision assembly; force/stiffness position compensation; compliant gripping

轴孔类零件是制造工业中的典型零件,它们相互间通过轴孔配合的形式联接在一起,最终组成了具有各种复杂功能的最终产品.最终产品的性能不仅受各组成零部件的制造精度影响,还与各零部件间的配合形式、装配精度密切相关.装配精度受多重因素的影响,往往难以满足实际应用要求,尤其是在基于过盈装配的多零件轴孔精密装配时,装配力大且离散对装配精度产生不利影响,自动装配时的精度补偿较难实现.

在多圆环零件轴孔精密装配中,圆环零件与模具装配孔构成一种特殊的轴孔装配模型(孔轴长度比大),导轨驱动圆环零件进入模具装配孔等同于插孔作业.本文设计了具有径向柔顺、轴向

收稿日期: 2012 -06 -07.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075058).
作者简介: 罗 怡(1973—),女,副研究员,博士生导师.
通信作者: 王晓东,xdwang@ dlut. edu. cn.

刚性的柔顺夹持机构,以避免装配过程中因径向定位偏差导致的卡阻现象. 通常为保证插孔作业的顺利进行及定位精度,可采用阻抗控制方法[1-3]、位置约束控制方法[4]、智能控制方法[5-6],这些控制方法主要是针对间隙配合轴孔类零件的精密装配. 本文提出基于力/刚度综合补偿方法,以补偿多零件装配时,被装配零件的尺寸公差离散导致的过盈装配力不同对装配精度的影响. 基于柔顺夹持机构和力/刚度综合补偿方法,研制了精密装配系统. 由于最终装配组件由多个轴孔类零件装配而成,且零件的间距有严格的要求,本文采用基于工业内窥镜的检测系统实现狭小无照明空间内零件的在线检测,利用该系统可检测出装配过程中任一零件装配的位姿信息,从而能及时发现装配不合格零件,提高装配合格率.

1 系统总体结构

1.1 多零件轴孔精密装配及检测原理

本文的被装配零件为薄片圆环零件,1 个组件中需要装配 15 片以上. 圆环零件的外径为 $6^{+0.015}_{+0.005}$ mm,内径为 5 mm,厚度为 0.25 mm,材料为黄铜. 采用过盈装配,将圆环零件依靠过盈力直接定位在装配模具的相应位置,模具的装配孔直径为(6 ± 0.002) mm. 圆环零件装配作业时,柔顺夹持机构由作业运动平台驱动,夹持圆环零件运动至装配模具内并装配至目标位置,装配力传感器实时检测装配过程中的装配力并将信息传输入控制计算机.

由于圆环零件的装配在密闭且狭小的模具内部进行,缺乏照明,故在模具装配孔的两侧开观测孔和观测缝,将照明与图像采集一体的硬杆内窥镜伸入模具的观测孔,通过侧向观测缝采集圆环零件的图像信息,经工业 CCD 传入控制计算机并进行分析处理. 内窥镜由带有光栅尺的精密运动平台驱动,结合光栅尺的信息得到内窥镜的位置信息,从而获得圆环零件的位置信息. 圆环零件装配及检测原理如图 1 所示.

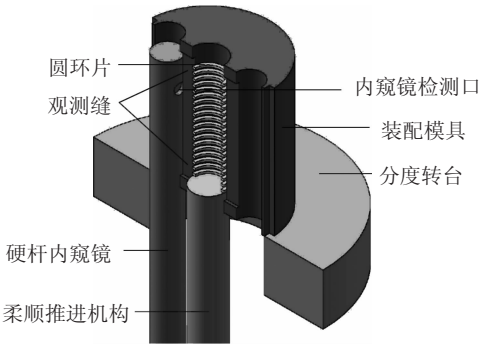


图 1 圆环零件装配及检测原理示意图

1.2 圆环零件精密装配及检测系统

根据上述圆环零件自动装配及检测系统原理,设计了如图 2 所示的系统的控制结构. 该系统由计算机控制单元、圆环零件装配作业模块和检测作业模块组成. 计算机控制单元用于设备的自动化控制及人机交互,以实现系统的运动控制及多传感器信息的输入及分析处理. 装配作业模块用于圆环零件的自动装配,主要由 X 向装配运动导轨,Z 向装配运动导轨等运动部件、圆环零件柔顺夹持机构等作业部件和 Z 向导轨上安装的光栅尺等部件构成. 检测作业模块用于对已装配圆环零件的位姿信息进行实时检测,主要由 Y 向检测运动导轨,Z 向检测运动导轨、硬杆内窥镜、工业 CCD 相机等组件组成.

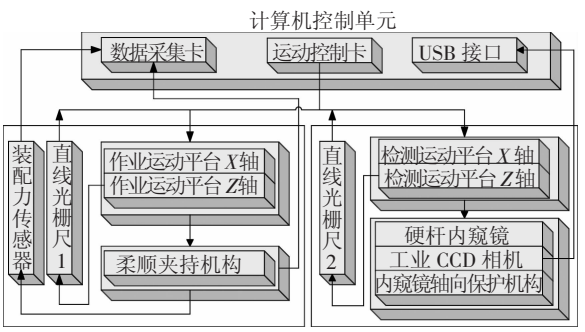
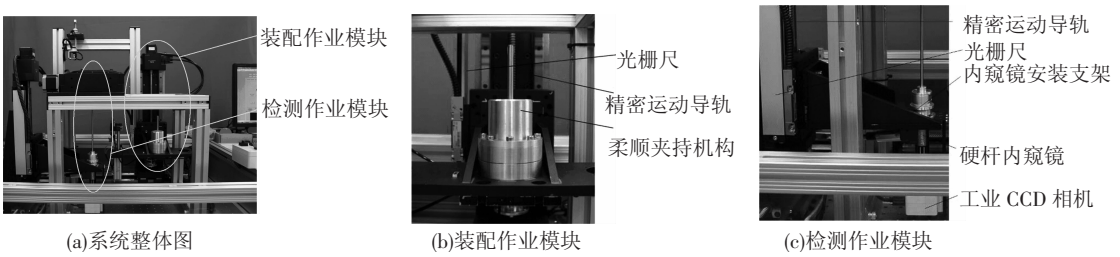


图 2 导电滑环精密装配及检测系统结构框图

整套系统实现自动化作业,由计算机根据导轨位置信息检测、力检测、视觉检测等所获取的作业信息协调控制系统中各运动及功能部件.

根据上述装配机理,设计搭建的多圆环零件轴孔精密装配及检测系统如图 3 所示.



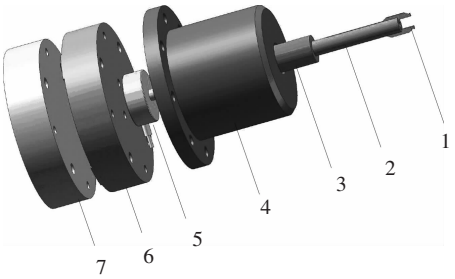
(a)系统整体图 (b)装配作业模块 (c)检测作业模块

图 3 多圆环零件轴孔精密装配及检测系统

2　系统关键技术

2.1　柔顺夹持技术

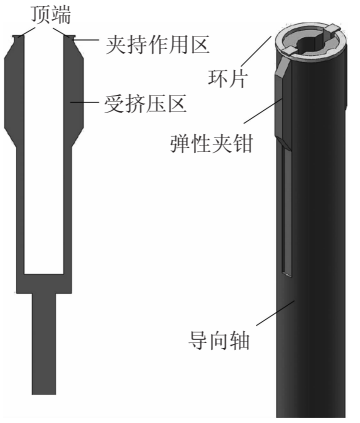
圆环零件的外径大于模具装配孔 3 ~ 17 μm，因此在进行圆环零件过盈装配时，装配阻力较大，一旦被装配零件与装配孔存在微小定位偏差，会引起卡阻和楔紧，从而导致装配失败. 若采用常规的运动位置控制，无法消除圆环零件的制造误差等不确定因素对定位精度的影响. 故本文设计了一种具有径向柔顺、轴向刚性较好的柔顺夹持机构. 该夹持机构主要由弹性夹钳、导向轴组件、力传感器及其他固定联接部件组成，如图 4 所示.



1—弹性夹钳；2—导向轴；3—轴承；4—轴承固定筒；
5—力传感器；6—力传感器固定板；7—固定底板.

图 4　柔顺夹持机构结构图

弹性夹钳安装在导向轴的凹槽内，凹槽的缝宽大于弹性夹钳的厚度约 0. 2 mm. 导向轴组件安装在轴承固定筒中，导向轴底端与力传感器联接，以实现在装配过程对轴向装配力的检测. 弹性夹钳为一对称双悬臂式结构，其工作区域由顶端、夹持作用区和受挤压区组成，如图 5(a)所示. 夹持圆环零件时，圆环零件内壁套在弹性夹钳夹持作用区，夹钳悬臂的弹性回复力将圆环零件夹紧，实现对圆环零件的径向定位；在轴向方向上，圆环零件安装在导向轴上端面及弹性夹钳的顶端之间，圆环零件底面与导向轴上端面接触，上面被弹性夹钳顶端压住，以此实现轴向定位，如图 5(b)所示. 若圆环零件在水平面内与装配孔存在定位误差，弹性夹钳会受力变形，实现水平面内 X 方向上的柔顺，同时利用弹性夹钳与凹槽之间的间隙实现水平面内 Y 方向的柔顺，从而使得该柔顺夹持机构对圆环零件与装配孔间的径向定位误差具有一定的容错性. 装配时，弹性夹钳受挤压区接触装配孔内壁后向中心收缩，夹钳夹持作用区亦向中心收缩，使得夹钳顶端宽度小于圆环零件的内径，圆环零件仅与导向轴上端面接触，被导向轴驱动向上运动实现轴向的精确定位. 夹持机构退出时，弹性夹钳及导向轴自动与圆环零件脱离接触.



(a) 弹性夹钳结构图　　(b) 圆环零件夹持示意图

图 5　夹持原理图

图 6 为装配作业过程中，该柔顺夹持机构夹持、脱离圆环零件的状态示意图. 装配作业过程中，柔顺夹持机构轴向受到的装配阻力由安装在导向轴正下方的力传感器进行测量，实时检测装配力信息.

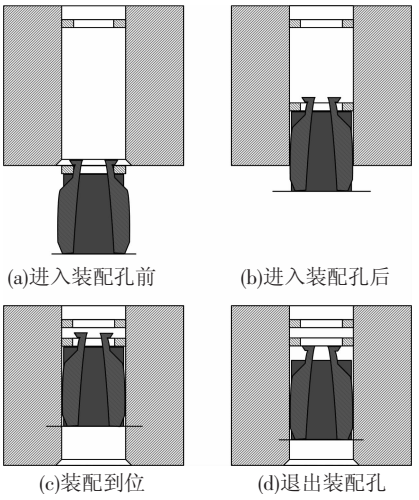


图 6　柔顺夹持机构夹持圆环零件的状态示意图

2.2　圆环零件精确定位技术

本文采用精密运动导轨驱动上述柔顺夹持机构和圆环零件运动至模具装配孔内部，实现圆环零件的定位. 为提高圆环零件的定位精度，Z 向装配运动导轨加装直线光栅尺构成闭环位置控制系统，通过精确控制装配运动导轨的位置来保证固定安装在导轨作业机械臂上的圆环零件的位置精度. 但是，由于圆环零件与模具装配孔为过盈配合，装配过程中阻力较大，且由于公差离散，装配力的大小偏差也较大，在 20 ~ 50 N 之间内波动. 当装配系统受装配阻力时，驱动圆环零件运动的 Z 向装配运动导轨受装配阻力作用发生倾斜；此外，安装有柔顺夹持结构的作业机械臂以悬臂梁方式安装在 Z 向装配作业运动导轨上，受装配力作用发生挠曲，如图 7 所示，该偏移量 ΔZ 不能被安装在 Z 轴导轨上的直线光栅尺测得，影响圆环

零件的装配精度.

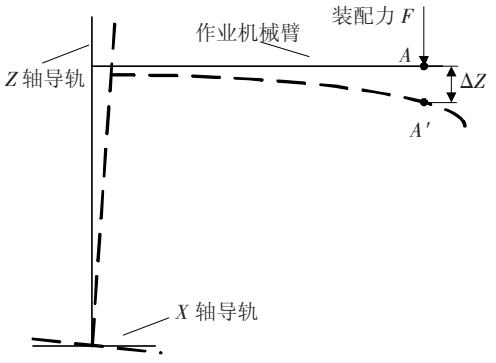


图 7　装配系统受力变形图

为减小圆环零件定位偏差,本文提出了力/刚度综合补偿方法控制导轨运动以补偿定位偏移,实现对圆环零件的精确定位,该方法原理如图 8 所示.

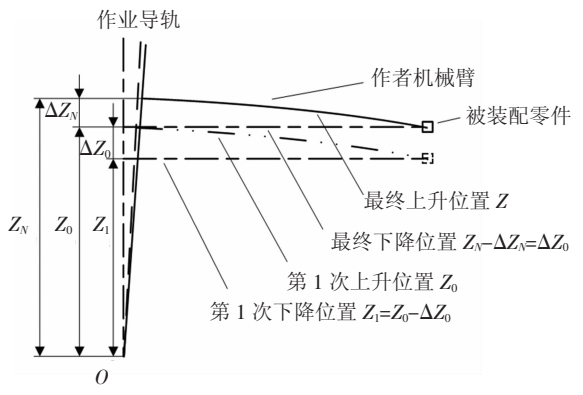


图 8　力/刚度综合补偿方法示意图

首先,不考虑系统受力变形,控制作业导轨带动被装配零件运动至装配目标位置 Z_0,并检测此时装配力大小 F. 第 2 步,控制作业导轨沿装配反方向运动,装配力在此过程中一直减小,当减小至零时,立即停止导轨运动. 通过光栅尺检测导轨反向移动距离 ΔZ(即系统受力变形量),该距离等于被装配零件实际位置偏离装配目标位置的距离. 在此段运动过程中,由于被装配零件与驱动装置的接触状态一直不变,故零件实际位置保持不变. 第 3 步,根据测得的装配力 F 与系统变形量 ΔZ,可计算得到系统在装配方向上的刚度:$K = F/\Delta Z$. 第 4 步,控制作业导轨沿装配方向运动,并实时检测导轨位置信息 Z 和装配力 F,依据上一步中更新获得的系统刚度 K,可算出零件的实际位置 $Z' = Z - F/K$,当零件的实际位置 Z' 与装配目标位置 Z_0 相等时,立即停止作业导轨运动. 第5 步,重复第 2 步,作业导轨反方向运动,当反向移动结束后的导轨位置 $Z_i = Z_0$ 时,该零件装配作业结束. 否则,继续重复第 3 ~ 5 步. 作业流程如图 9 所示.

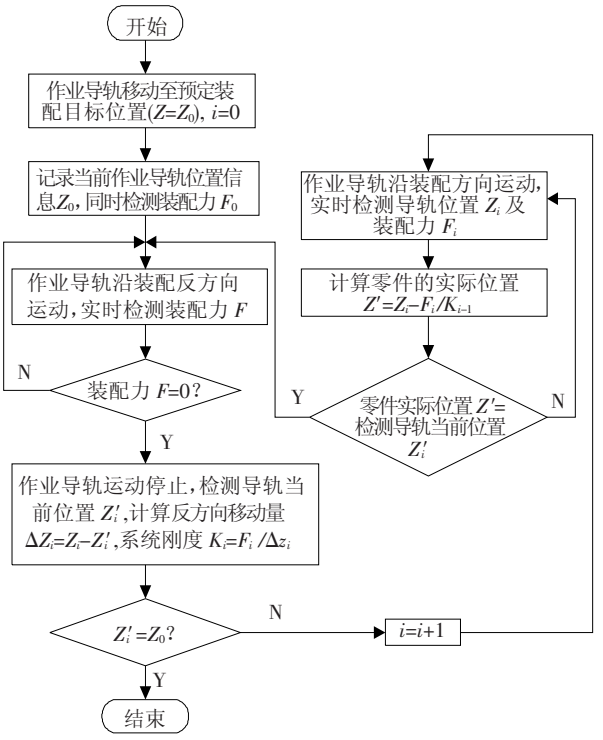


图 9　力/刚度综合补偿方法装配流程图

2.3　狭小空间内基于内窥镜的精密视觉测量技术

对装配模具内的圆环零件位置进行检测时,由于模具内部空间狭小且无照明,使得普通的工业 CCD 相机及光学镜头无法伸入被检测区域获取图像. 硬杆内窥镜利用其本身的光源接口实现一体化照明,且能通过其狭长的镜杆伸入至狭小空间内采集图像. 但是,由于内窥镜属于非远心镜头,其图像存在非线性畸变,导致图像信息不能精确表征实际被测对象的位置信息,使得已有的内窥镜的视觉技术被局限在定性检测[4-10].

为利用内窥镜实现对已装配零件的位置和姿态精确测量,本文依据内窥镜图像中心处畸变最小的特点,结合光栅尺对圆环零件位置的检测信息,提出了内窥镜解耦检测方法. 移动内窥镜至测量位置,使被测对象成像于图像中心处. 对采集到的圆环片图像进行处理,计算圆环片图像距离图像中心的偏差值,若内窥镜尚未运动到正确的测量位置,则根据由图像处理获得的偏差值引导精密运动导轨带动内窥镜继续调整测量位置. 对于不同位置处的零件,内窥镜所需的测量位置也相应地不同,故被测零件的位置信息可由内窥镜的测量位置信息来表征,而内窥镜的测量位置信息则可由光栅尺精确测得. 检测原理如图 10 所示,测量流程如图 11 所示.

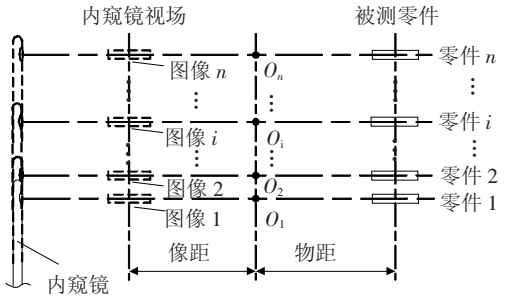


图 10　内窥镜测量方法示意图

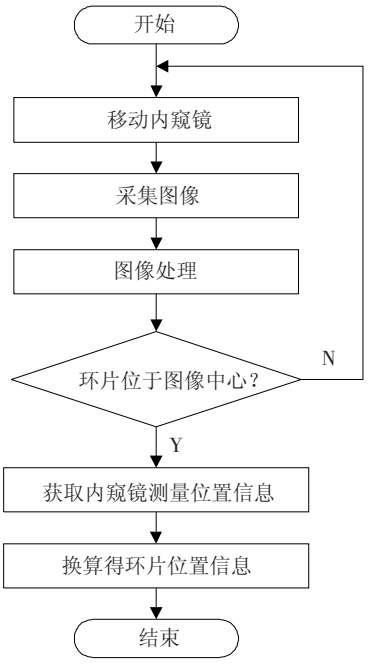


图 11　内窥镜测量流程图

3　多零件轴孔装配实验结构与讨论

利用所研制的多圆环零件轴孔精密装配及检测系统进行 21 片圆环零件的装配和检测作业实验，装配间距周期为 0.35 mm. 在进行实际圆环零件位置检测实验前，先对系统进行标定，将图像坐标系中的像素单位转化为实际尺寸. 本文选取 250 μm 厚的标准量块对系统进行标定，图像中的每像素代表的实际尺寸为 3.57 μm.

利用标定完成后的系统进行圆环零件装配实验，然后对装配完成的圆环零件的位置信息进行检测. 图 12 为系统采集到的装配完成后的圆环零件在模具内部的图像. 为验证该系统装配和测量结果的有效性及精度，将装配完成后的圆环零件进行灌胶固化，然后从模具中取出，利用测量精度为 3 μm 的万能工具显微镜（Olympus STM6）对其进行测量，并将其测量结果与系统检测结果进行比较，实验数据如表 1 所示. 由表中数据可知，圆环零件装配的误差最大值为 6.1 μm，误差最小值为 −9.4 μm，误差的平均值为 0.2 μm；系统检测的误差最大值为 8.2 μm，误差最小值为 −1.7 μm，误差的平均值为 3.7 μm，满足精密装配的要求.

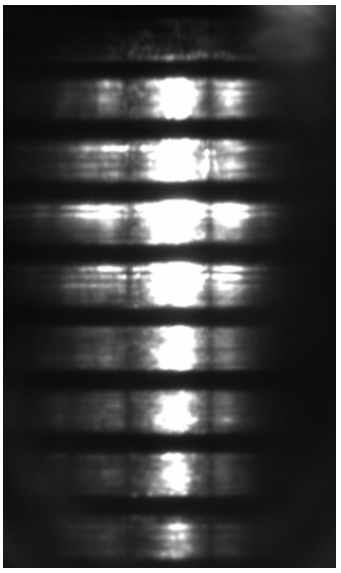


图 12　装配完成后圆环零件的内窥镜检测图像

表 1　系统装配及检测实验数据

圆环零件编号	检测距离/μm		装配误差/μm	检测误差/μm
	万能工具显微镜	内窥镜		
1	0	0	—	0
2	357.4	356.1	6.1	1.3
3	699.9	701.6	1.6	−1.7
4	1 052.2	1 053.3	3.3	−1.1
5	1 404.6	1 403.3	3.3	1.3
6	1 750.2	1 747.9	−2.1	2.3
7	2 106.3	2 102.5	2.5	3.8
8	2 452.4	2 446.0	−4.0	6.4
9	2 805.9	2 799.7	−0.3	6.2
10	3 155.0	3 153.6	3.6	1.4
11	3 503.6	3 501.6	1.6	2.0
12	3 853.0	3 846.9	−3.1	6.1
13	4 204.5	4 198.7	−1.3	5.8
14	4 555.4	4 548.9	−1.1	6.5
15	4 905.8	4 898.0	−2.0	7.8
16	5 255.5	5 247.3	−2.7	8.2
17	5 602.3	5 595.5	−4.5	6.8
18	5 951.6	5 946.5	−3.5	5.1
19	6 299.6	6 296.0	−4.0	3.6
20	6 641.5	6 640.6	−9.4	0.9
21	6 996.4	6 995.6	−4.4	0.8

系统的装配及检测误差的主要因素是由系统的硬件误差、运动控制误差及检测误差构成. 其中，系统的硬件误差包括系统中机械和光学部件的安装误差及自身缺陷误差，如装配及内窥镜检

测方向上精密运动导轨的运动轴线平行度误差、CCD 摄像头成像平面与被测圆环零件表面间的平行度误差等. 运动控制误差,主要由装配及内窥镜检测方向上的运动控制误差造成,由于这两个方向上的精密运动导轨均加装直线光栅尺组成了闭环运动控制系统,故其运动控制误差能控制在光栅尺的精度范围内,也就是小于 3 μm. 检测误差指由于内窥镜与 CCD 成像环境与万能工具显微镜的成像环境不同,内窥镜与 CCD 的成像效果较差,读取像素时存在一定误差. 此外内窥镜检测的是自动装配后的圆环零件组件,而万能工具显微镜检测的是胶固化定位后取出的圆环零件组件,因此胶固化过程中固化应力也会对检测结果产生影响.

4 结 论

1)针对轴孔精密装配及检测系统作业任务的特点,研制了一套多圆环零件轴孔精密装配及检测系统.

2)该系统采用精密运动导轨,基于力传感器、光栅尺和工业内窥镜实现了多圆环零件的自动装配和检测,解决了目前手工中精度差、合格率低的问题.

3)该系统集成了柔顺夹持机构,可实现径向柔顺和轴向刚性,在自动装配中可有效夹持零件进入装配模具孔,在装配到位后可实现零件与夹持机构的无干涉脱离.

4)提出并实现了装配力/刚度综合补偿方法以实现较大且离散的装配力作用下,多个被装配零件的精确定位. 运用解耦检测方法实现了被装配零件的狭小空间内的基于工业内窥镜的在线检测. 利用所研制的系统进行了圆环零件装配、检测实验,结果表明系统的装配误差在 -9.4 ~ 6.1 μm之间,使用内窥镜检测的不确定度可控制在 -1.7 ~ 8.2 μm 之间,满足精密装配中的精度要求.

参考文献

[1] LU Z, CHEN P, GANAPATHY A, *et al.* A force-feedback control system for micro-assembly [J]. Journal of Micromech Microeng, 2006, 16 (9):1861 - 1868.

[2] SALEHI M, VOSSOUGHI G R. High-precision impedance control method for flexible base moving manipulators [J]. Adv Robot, 2009, 23 (1/2): 65 - 87.

[3] IRAWAN A, NONAMI K. Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain [J]. J Field Robot, 2011, 28(5):690 - 713.

[4] 张锟, 韦庆, 常文森. 一种基于力/位混合控制进行插孔作业的策略[J]. 机器人, 2002, 24(1): 44 - 48.

[5] 王鹏, 吴成东, 张凤. 机器人轴孔装配控制技术研究进展[J]. 科技广场, 2007, 14(3): 6 - 8.

[6] XIAO N, SAEID N. Visual feedback control of a robot in an unknown environment: learning control using neural networks [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2004, 24 (7/8): 509 - 516.

[7] 陈果,汤洋. 基于孔探图像纹理特征的航空发动机损伤识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1710 - 1713.

[8] 许友林, 姚智刚, 熊玲,等. 内窥镜检测技术在舰船发动机状态检测中的应用[C]//现代船舶机电维修技术. 大连:中国造船工程学会, 2005: 376 - 379.

[9] 孟娇茹, 王娟. 孔探成像在发动机损伤检测中的应用研究[J]. 节能技术, 2009, 27 (1): 69 - 73.

[10]易霞. 无损检测技术在姿控发动机总装中的应用探析[J]. 火箭推进, 2009, 35 (5): 50 - 55.

(编辑 魏希柱)