

自动微装配技术在航空机载光机电传感器装调中的应用

Application of Automatic Micro-Assembly Technology in Airborne Mechanical/Electronic/Optical Sensor Assembly

中航工业西安飞行自动控制研究所 王 晖 滕 霖 赵宝林

[摘要] 介绍了自动微装配技术在机载传感器装调中应用的整体思路及应用方案,通过对微小型零件夹持、精密定位、显微视觉和在线测量等先进装调中关键技术的研究,开发了光纤陀螺、高精度加速度计等产品成套自动装配的技术装备,解决了目前精度不高、装调一致性差、手工作业和产能不足等问题,从而整体提升了机载产品制造技术的水平。

关键词: 微小结构 微装配 精密装调 传感器

[ABSTRACT] The overall thoughts and plans of applying of automatic micro-assembly technologies for airborne sensors are introduced. Based on the research of micro parts holding, precise positioning, micro-vision and online measurement technologies, the fiber gyro assembly system and accelerometer assembly system are presented. It solves the problems of the poor statement of precise, assembly compatibility, manual operation, manufacture capability, in order to improve the overall ability of airborne sensors assembly and adjustment.

Keywords: Microstructure Micro-assembly
Precise adjustment Sensor

微小型化技术是面向 21 世纪的重要军民两用技术之一,它的发展对民用和国防等相关技术的发展有着深刻的影响。随着科技的发展,对微小型装置的功能、性能及可靠性等方面的要求越来越高,对精密微小型零件及产品的需求也日益迫切。微小型零件的几何尺寸一般在亚微米到几十个毫米的范围内,其加工技术(如硅微工艺、LIGA 工艺和精密机械加工技术等)已经达到一定发展水平,但相应的装配技术发展仍然比较缓慢,绝大多数微小型零部件仍然采取手工的装配方法,不仅周期长、而且成本高,使之在批量生产和产品合格率方面受到较大的限制。

20 世纪中后期, MEMS (微机电系统) 技术出现,并得到快速发展,到 20 世纪末已形成集微型机械、微

传感器、微能源、微致动器、微控制器、微执行器、微弱信号处理和智能控制于一体的新兴研究领域。微机电系统基本技术主要有微机械系统设计技术、复杂可动结构微细加工(高深宽比多层微结构加工)、微机械材料、微装配和封装、微操作、微测量、微系统的集成与控制及微宏接口等技术。随着微机电系统技术的深入发展,微机械技术的研究已经从基础研究阶段逐步发展到研制开发与实用阶段,许多微传感器、微执行器和微光学部件已经获得广泛应用。

伴随着 MEMS 技术的发展,美国、日本、德国及欧盟的一些发达国家均在微小型器件装配技术方面开展了前瞻性研究,并取得了一定成果,研究内容涉及微装配体系的体系结构、微小物体的抓取和释放以及微构件的连接等^[1-6]。慕尼黑工业大学开发研制的微装配系统集成了视觉、力觉等传感器,能够进行胶粘接和焊接等微装配作业^[7];美国卡内基梅隆大学机器人研究所研制开发了用于自动微装配与模块化体系结构研究的样机系统^[8];韩国科学技术学院微系统研究中心研制了柔性微装配系统用于光子器件的装配^[9];另外,目前已有采用微小型移动机器人在扫描电子显微镜真空舱室内进行微装配作业的系统^[10-11]。近年来,国内的哈尔滨工业大学、大连理工大学、清华大学、上海交通大学等一些院校在微装配技术的一些共性技术问题(如微操作机器人技术、微型夹钳、显微机器视觉以及微型零件的精密定位)等方面开展了大量的研究^[11-12],如哈工大机器人研究所研制了具有显微视觉和力觉的微装配作业系统;北航机器人研究所、大连理工大学微系统研究中心等单位研制了微操作系统;清华大学精密仪器与机械学系研制了微装配系统面向微器件的精密定位与装配;上海交通大学研制了体积为数立方厘米的微型运输机器人和微型装配机器人。目前国内在微小型零件装配的系统技术与应用方面开展的工作不多,一些单元技术还停留在实验室阶段。

随着传感器器件的小型化和零件更加微型化,手工装配将受到很大局限。借助于微装配技术,可通过柔性

好、操作灵活、能适应各种作业特点的微型作业机械手装配来实现较高的定位精度和微细操作,实现人手难以实现的高精密、高精度微装配。自动化微装配不仅可提高效率、批量装配、降低成本,还可以大幅降低操作人员的劳动强度。

微装配技术经历了从最初的显微镜下手动操作,到能够单件半自动化、自动化操作的阶段,其发展趋势为模块化微组系统的研究。因此,从微装配体系的体系结构研究出发,根据具体微装配的特点和实际需求,构建模块化微操作系统,建立实用化高效微装配平台,是目前微装配技术装备的发展趋势。微装配关键技术包括微小结构微装配基础工艺及机理、显微视觉技术、微夹持器、微驱动技术以及自动化装配技术。微装配及自动化装配在先进传感器中的应用关键是装配工艺流程设计及微系统关键模块实现。

随着新一代传感器向高精度、小型化、高可靠性方向发展,先进制造技术的需求更为迫切。加工及装调是产品实现的两大根本制造技术,而通过在传统加工技术上挖潜来大幅提升产品性能和生产批量已无显著效果,因此如何通过提高产品精密装调技术来进一步提高产品精度及性能,进而提升整体制造能力及制造水平尤为关键。国外发达国家早已实现军品柔性装调及装调自动化,而我国机载乃至整个军工在这方面尚处于起步阶段,与国外差距较大。新产品到了微小型阶段,微装配成本往往要占到产品制造成本的50%以上。因此实现新型微小传感器精密装调,提高产品质量及性能,满足研制需要和高效批量生产,发展微装配技术及自动化装调手段成为必然。

1 机载光机电传感器的装调与自动微装配技术

航空机载产品在高精度、小型化、高可靠性等方面的要求不断提高,要求微小型零件装配、调试技术向微小型化及高精度发展。光纤陀螺和微小型加速度计是具有代表性的第3代航空机载惯性器件,其精密性、复杂度、可靠性和结构微小型化程度较高。国内由于长期以来缺乏对这样一类装调工艺的重视和基础研究的投入,工艺水平与国外存在很大的差距,目前国内主要依靠手工装调,装配效率低,结果一致性差,严重制约产品的装配精度、质量和生产效率。本文针对光纤陀螺、高精度加速度计和微小型化加速度计的装调问题,重点分析上述产品中关键和核心部件或组件的装配工艺,开展微装配技术的应用研究,提高产品装调的质量、一致性及自动化水平。

(1) 超细保偏光纤耦合器 / 偏振器的制作。

超细保偏光纤耦合器 / 偏振器的制作是光纤陀螺制造技术的核心,目前仅靠手工已无法满足批量制造装备的需求,同时不稳定的装配质量也严重影响到装备的质量及交付。随着配套需求的急剧增长,迫切需要开展先进制作工艺的研究,研制自动化设备,以突破制约瓶颈,提高产品的成活率和批量生产能力。

(2) 高精度加速度计摆组件的装配。

目前高精度加速度计的精度已经达到了 1×10^{-5} 的量级,在如此高的精度下,只有通过提高装配精度及工艺一致性实现产品质量的稳定。摆组件是加速度计的核心组件,其装配精度直接影响产品的精度。应用自动微装配技术是可行的技术途径,将有效地提高装配的自动化程度,降低人为因素的影响,提高产品的一致性,满足批量生产的需求。

(3) 微小型化加速度计薄壁结构件的组装。

微小型化加速度计薄壁结构件的组装是加速度计小型化亟待解决的关键问题,薄壁结构件的组装过程中,精细的作业对操作者人员技能要求非常高,不但操作过程复杂、效率低,而且难以达到加速度计要求的性能,因此非常有必要采用自动化高效组装设备代替手工操作,同时可有效解决人手装配中不可避免地引入装配应力的问题。

上述3个具有代表性的光机电机载传感器都存在着制约当前研制及生产的瓶颈环节。通过应用微装配及自动化装配等先进装调技术,建立开环光纤陀螺、高精度加速度计等产品的自动化装调生产线,能够满足小型化加速度计微小器件高精度装调的需求,并提高型号产品装调质量及效率。通过示范应用,将巩固研究基础,提高研究能力,并在基础和关键的技术上实现突破。具体包括开展以下2个主要方面的研究,以提高航空光机电惯性器件系统综合装调工艺工程化生产能力,突破制约产品性能、质量和生产效率的关键,满足研制生产需求。

(1) 微装配共性基础技术。具体研究内容包括基于机器显微视觉的精密定位技术;在线显微视觉测量与闭环柔性精密调整技术;微装配单元多自由度精密定位技术;具有微力感知功能的微型夹钳等微小型零件作业工具技术;微装配系统体系结构与系统集成等关键技术;微小结构粘接应力控制与释放工艺,微小型零件粘接涂胶方式、涂胶量精确控制工艺等。

(2) 高精度、微小结构先进装调工艺技术。首先研究传感器产品性能域参数与几何域参数的映射关系模型,建立微小结构综合装调系统模型,如图1所示,并研究

基于器件性能的测试数据和参数,通过精密几何定位、调整等单元模块,实现微小装调。通过对各装配环节关键工艺的研究,建立起系统误差分析与装配精度控制之间的影响分析及对应关系,并指导生产线应用及设计改进,如图 1 所示。

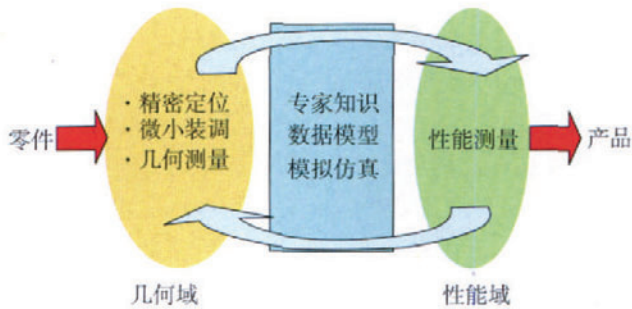


图 1 微小结构综合装调系统模型

Fig.1 Model of microstructure adjustment system

2 自动装调设备的研制

2.1 超细保偏光纤耦合器 / 偏振器的制作设备

超细保偏光纤耦合器 / 偏振器的制作是光纤陀螺核心制造技术,通过对耦合器、偏振器性能与熔融拉伸张力、熔融加热温度、拉伸速度以及偏振器性能与偏振晶体熔化速度、结晶速度及温度场等工艺参数之间的关系进行研究,设计保偏光纤耦合器 / 偏振器微制作系统工艺流程,确立系统各部件衔接关系,在此基础上研制出光纤陀螺耦合器 - 偏振器微制作系统。

总体工艺采取在线熔融拉伸技术即高频高压电弧加热光纤、微磁力拉伸光纤,并通过预设拉伸速率闭环控制熔融拉伸,确保光纤被柔性拉伸;在不同拉伸时刻设置相应的微拉伸力、拉伸速度,确保光纤被均匀拉伸。其系统构成包括保偏光纤偏振轴对轴部件、熔融拉伸部件、光功率检测部件、偏振晶体制作部件和控制软件等。

2.2 高精度加速度计摆组件组装设备

摆组件装配、磁钢组件装配及总装是加速度计装配的 3 个关键环节,其中摆组件装配是核心,其装配精度及工艺一致性决定着加速度计的精度和质量。对于加速度计摆组件微装配系统,根据装配工艺要求,研制了基于机器视觉的精密测量、装配作业、零件上料及回转工作台等核心模块的微装配系统,实现精密定位功能、显微视觉控制功能、微小夹持与拾取功能以及避免引入装配应力的柔性锁紧功能等。加速度计摆组件装配系统外观和摆组件夹持、固定装置如图 2、3 所示。

高精度加速度计摆组件装配系统目前已装配数十块摆组件,并完成了样件成表装配,工艺一致性得到显著提升,装配合格率由 20% 大幅提高到 50%,人员装配难度显著下降。现正在进行高精度加速度计壳体及总装微装配系统的研制,研制完成后,有望实现高精度加速度计的自动化装配生产线,大幅提升质量及产能。

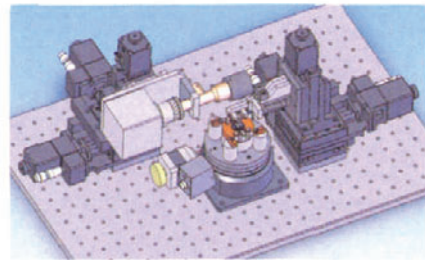


图 2 加速度计摆组件装配系统整体外观

Fig.2 Overall exterior of accelerometer micro-assembly system

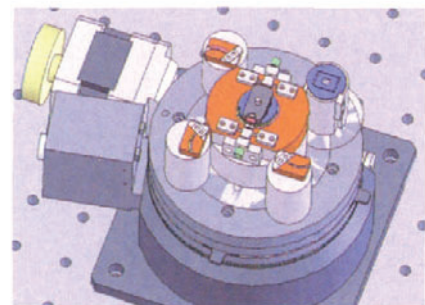


图 3 摆组件夹持及固定装置示意图

Fig.3 Microstructure holding of accelerometer

2.3 小型化加速度计

小型化加速度计薄壁结构件等微小关键件的组装是加速度计小型化亟待解决的问题,需达到微米级精度操作,装配精度直接影响到加速度计的性能。根据装配工艺要求,设计采用由具有零件精密定位模块、微操作定位模块、力感知功能的微吸附模块、显微视觉模块、压紧模块以及人机交互模块组成的摆组件微装调系统方案,实现摆组件的高精密微小装配:

- (1) 通过减少夹持过程中对工作面的接触来减少或避免零件损伤;
- (2) 通过利用零件自重重心,选取恰当的夹持点以减少应力的引入;
- (3) 通过采用真空吸附方式、选取特殊柔软材料吸附头以及吸附头分段下降工艺方式,实现无损装配;
- (4) 通过辅助以高精度步进电机和导轨以及在线显微视觉技术来实现高精度定位。

小型化加速度计摆组件装配原采用显微镜人工装配,现已通过微机械手夹持、微定位和微驱动等微装配装置,采用在线显微视觉技术实现半自动装配,人员装配强度显著下降,装配精度提高半个数量级。

3 结论与展望

本文提出应用微装配技术解决航空机载光机电传感器装调中的瓶颈问题,通过对微装配共性基础技术和先进装调工艺技术的研究,解决了微小型典型传感器装配中的问题,研制了高精度加速度计摆组件装配系统和小型化加速度计摆组件微装配系统,并投入试生产,大幅度提高了自动化程度、产品质量及一致性、生产效率以及合格率。

通过高精度加速度计、小型化加速度计和光纤陀螺生产线等装配系统样机的研制,并经试验形成相应的装调工艺规范,进行示范应用,在此基础上将建成高精度加速度计和光纤陀螺 2 条自动装配生产线,同时在激光陀螺、导电环等其他光机电传感器上推广应用,整体提升机载制造技术,实现自动化装调。

从产品创新研制上讲,可实现人手难以实现的微装配技术,能够确保高装配中的精密定位及微调整;从基础能力上讲可提高产品装调过程的工艺一致性及效率,有着行业普遍应用及推广价值,可以为多种微小型器件、产品的组装提供可行的解决方案,在一定程度上提升微小型器件的研发能力,并促进微小型零件整体制造技术的进步。

参 考 文 献

- [1] Brussel H V, Peirs J, Reynaerts D, et al. Assembly of microsystems. Annals of CIRP, 2000, 49 (2) : 451-472.
- [2] Menciassi A, Eisenberg A, Izzo I, et al. From macro to micro manipulation models and experiments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9 (2) : 311-320.
- [3] Hesselbach J. New aspects of microassembly. Peter M. Knoll. Proc. of VDE World Microtechnologies Congress 2000, Vol.2, VDE World Microtechnologies Congress, Hannover, 2000, VDE Verlag, 2001: 45-50.
- [4] Almansa A, Wögerer, C. ASSEMIC: Handling and assembly in the micro dimension. Proc. of the 2007 IEEE Int. Symp. On Assembly and Manufacturing, Michigan, USA, 2007: 172-177.
- [5] Wang X D, Hesselbach J. Bonding of miniature parts with adhesives and vision based procedure inspection. China Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17 (2) : 289-292.
- [6] Doering M. Microdrops for microparts. VDE World Microtechnologies Congress, Hannover, 2000, Hannover: VDE Verlag,

2001: 61-64.

- [7] Nienhaus M. Moderne verfahren und werkzeuge für die industrielle montage hybrider mikrosysteme. Seminarberichte (1999) 44: Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen, München, Germany, April 1999:4.1-4.25.
- [8] Ralph L. H, Arthur Q. Architecture for Agile Assembly. Proc. Am. Soc. of Precision Engineering. 10th Annual Meeting, Austin, 1995.
- [9] Kim B, Kang H, Kim DH, et al. Flexible microassembly system based on hybrid manipulation scheme. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2003 (2) : 2061-2066.
- [10] Wich T, Sievers T, Fatikow S. Assembly inside a scanning electron microscope using electron beam induced Deposition. Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct. 9-15, 2006: 294-299.
- [11] 席文明, 吴洪涛, 朱剑英. 微装配技术的发展现状. 机械科学与技术, 2002, 21 (6) : 861-865.
- [12] 张芳, 林良明. 微机械的基本特征、关键技术及应用前景. 传动技术, 2001 (1) : 25-32. (责编 玉龙)

更 正

本刊 2010 年第 1 期(总第 349 期)学术论文栏目中《超声喷丸强化搅拌摩擦焊接接头性能》一文中的图 3 应为

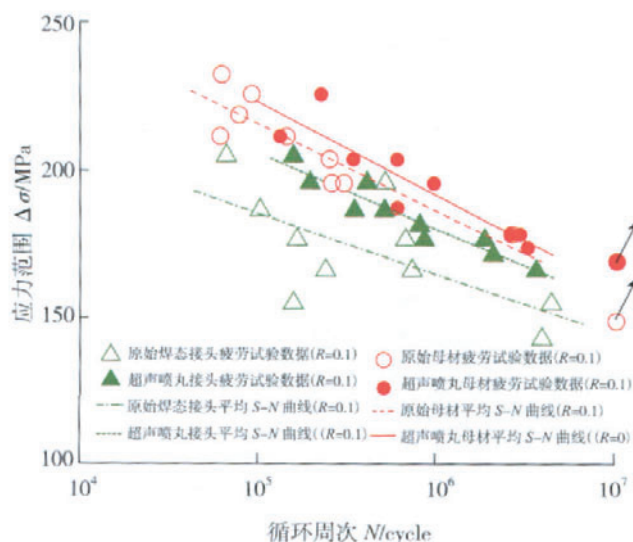


图 3 7075-T651 铝合金母材及搅拌摩擦焊接接头对比 S-N 曲线($R=0.1$)

Fig.3 Comparative curve S-N of base metal of 7075-T651 aluminum alloy and friction stir welding joint ($R=0.1$)

因技术原因致使内容有误,特此更正,由此给相关人士和读者带来的不便,深表歉意。