

文章编号 1004-924X(2003)01-0075-03

非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术

罗松保, 张建明

(中国航空工业第一集团公司 303 所 第一研究室, 北京 100076)

摘要:“Nanosys-300 非球面曲面超精密复合加工系统”是“九五”重点预研课题“非球面曲面的超精密加工与测量技术”的主要研究成果。重点对非球面曲面光学零件超精密加工机床,非球面曲面光学零件超精密加工工艺,非球面曲面光学零件超精密测量技术进行了研究。其主要技术成果有:非球面超精密复合加工系统综合设计和制造技术,高速超精密空气静压主轴系统,超精密闭式液体静压导轨系统,高速超精密空气静压磨头电主轴系统,开放式高性能数控系统集成技术等。系统的精度检测和工艺实验表明其研究水平进入了国际先进行列。

关键词:非球面;超精密;加工;测量

中图分类号:TQ171.684 **文献标识码:**A

1 引言

非球面光学零件在国防科技工业领域,以及民用光电产品方面都有着重要而广泛的应用。近年来,我国加快了超精密加工技术的研究步伐,研制出了少量非球面超精密加工机床,但大多功能单一,一般只有车削功能^[1-2]。少量进口的超精密加工机床最多也只有数控车削、磨削功能,再加之非球面超精密磨削工艺的复杂性,这些进口的机床的磨削功能基本上还未得到实际应用。因此,国内真正意义上的非球面超精密加工技术至今还未开展起来。“九五”期间,中国航空工业第一集团公司 303 所第一研究室对“九五”重点预研课题“非球面曲面的超精密加工与测量技术”进行了系统的科研攻关,成功地研制出了“Nanosys-300 非球面曲面超精密复合加工系统”。它具备超精密复合加工的功能,既能对典型有色金属材料进行单点金刚石超精密切削(SPDT)加工,又能对典型硬脆非金属材料进行超精密磨削加工。

2 非球面曲面光学零件超精密加工机床的研究^[3]

Nanosys-300 机床系统主要由以下部分构成:

(1) 机械系统,它包括:床身及隔振装置、导轨及驱动装置、主轴及驱动装置、延性方式磨削装置(砂轮主轴、砂轮电火花修形装置、EL ID 修锐装置)、机床位置测量装置、刀架及吸屑装置、喷雾冷却装置等;(2) 恒温供液系统、供气系统;(3) CNC 数控系统。

Nanosys-300 机床系统采用“T”形结构布局。机床底座采用稳定性好的大块天然大理石,超精密闭式液体静压导轨呈“T”形布局布置在大理石台面上,分别作为该系统的 X、Z 轴,它们由交流伺服电机通过 CO 级精密滚珠丝杠和四自由度精密丝杠溜板耦联机构进行驱动,其中 X 轴导轨上安装超精密空气静压主轴,其上的真空吸盘用于吸附加工工件。Z 轴导轨上安装微调刀架(机床用于单点金刚石车削(SPDT)功能时),或者作为机床 Y 轴的高刚性、超精密空气静压磨头(用于超精密镜面磨削(EL ID)功能时)。机床的位置通过

安装在 X 、 Z 轴上的高分辨率光栅以及其对应的驱动电机进行位置的闭环反馈控制。机床大理石底座通过具有隔振和自动调平功能的空气弹簧支承在防震地基上。同时,机床还配备了为空气静压主轴和磨头等服务的供气系统以及用于液体静压导轨的恒温供液系统,车削功能时的吸屑装置、喷雾冷却装置,以及磨削功能时的金刚石圆弧砂轮在线电火花修形、EL ID 修锐装置和磨头、工件恒温冷却系统。机床的电控部分采用基于现代控制理论的高性能多轴 CNC 精密数控与伺服系统。

3 非球面曲面光学零件超精密加工工艺的研究

3.1 超精密车削工艺研究

在单点金刚石切削(SPDT)工艺研究中,对有色金属材料诸如硬铝、黄铜、无氧铜等的典型零件(如平面、柱面、球面、非球面等)进行了切削工艺实验,重点研究了不同的刀具材料(普通工具钢刀具、硬质合金刀具、CVD 刀具以及金刚石刀具)、不同刀具几何形状参数和精度、不同的切削控制参数(主轴转速、进给量及吃刀量)对工件加工质量(零件的面形精度与表面粗糙度)的影响,同时还研究了切削液喷雾以及吸屑作用对加工质量的影响。

3.2 超精密磨削工艺研究

在超精密磨削工艺实验中,对典型硬脆非金属材料诸如玻璃、淬硬钢、半导体、陶瓷等的典型零件(如平面、球面、非球面等)进行了磨削工艺实验,重点研究了不同粒度、浓度的铸铁基金刚石磨轮、磨轮的不同断面几何形状、不同的磨削控制参数(磨头和主轴转速、进给量及吃刀量)对工件加工质量(零件的面形精度与表面粗糙度)的影响,同时还对磨轮的在线电火花修形以及在线 EL ID 修锐进行了实验研究,此外还就磨削液对加工质量的影响进行了研究。

4 非球面曲面光学零件超精密测量技术的研究

4.1 对刀装置^[3]

在数控编程、加工过程中,为顺利实现对刀功能以及刀具半径补偿,需要准确测量刀尖的空间

相对位置以及刀具刀尖的圆弧半径。刀具位置检测装置由高分辨率的气浮线性可调差动变压器(LVDT)气浮测头和后续处理电路组成。一个 LVDT 测头用于测量刀尖圆弧在 X 、 Z 平面内的空间位置以及在 X 、 Z 平面内刀尖圆弧半径,另一个则用于测量刀尖的高度,即 Y 向坐标。采用气浮测头,可以消除摩擦力的影响,并通过测头背向的恒压空气加压,使得测量力均匀。

4.2 非球面面形测量装置

非球面光学零件的面形检测技术是非球面加工技术的一个重要环节。面形测量分加工过程中的在位测量以及加工终了的面形测量,近年来我国在非球面测试技术研究上取得了一些研究成果,如激光扫描法、干涉法等,但适用于生产需要的、性能稳定的高精度实用化的非球面测量仪器尚无成功研制的报道。考虑到实际非球面零件的生产需要,为提高非球面零件的生产效率和加工精度,解决非球面零件在位测量与在位误差补偿的难题,在在位测量中采用高分辨率的 LVDT 气浮测头测量非球面面形。而对于工件的最终测量,本课题研制成功了相移式横向剪切干涉法测量光学非球面面形的检测装置及其配套检测软件,实现了对部分非球面光学零件精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 面形测量。

5 主要技术成果

(1)非球面超精密复合加工系统综合设计和制造技术

以往国内研制的超精密加工装置大都只有简单的车削功能,对硬脆材料(如玻璃)不能进行磨削加工,并且装置的其它辅助功能也很少。本课题研制的非球面超精密复合加工系统瞄准了国际同类系统的先进水平,开发的系统精度高、功能全、实用性强。系统同时具备车削和磨削加工功能,此外还开发了工件真空吸附、喷雾、吸屑、在位对刀、工件在位测量、空气弹簧减振等一系列相关配套技术和子系统。因此,课题所开发的系统技术完整性好,具有国内领先、国际先进水平。

(2)高速超精密静压主轴系统^[4,6]

为了适合微小零件和特殊材料零件的超精密加工,当前国际上先进的超精密机床主轴转速可达 $3\ 000 \text{ rpm}$ 或更高,而以往国内开发的超精密

加工装置主轴的最高转速仅到 500 ~ 1 000 rpm。本课题研制的主轴为了实现高速、超精密性能,在结构设计、动平衡、联轴器、电机等方面采取了一系列特殊的技术,使主轴转速达到近 3 000 rpm。此外,在主轴加工方面也采取了一系列措施,保证了主轴部件的加工精度(如转轴圆度达 0.2 μm)。通过上述工作,本课题的主轴系统成功地实现了高速、高精度(0.05 ~ 0.1 μm)的研制目标。

(3) 超精密闭式液体静压导轨系统

以前我国研制的超精密加工装置均采用气浮式导轨结构,使用效果不理想。为了提高系统刚性和减振效果,采用闭式液体静压导轨已成为国际上超精密加工机床导轨技术的发展趋势。本课题在国内率先研制成功了超精密闭式液体静压导轨系统,并在该系统中采用了自行研制开发的四自由度精密丝杠溜板耦联机构,有效地保证了超精密导轨运动和定位性能。

(4) 超精密空气静压磨头电主轴系统^[4-6]

适合超精密机床使用的超精密磨头系统在国内尚属空白,而从国外进口一套磨头系统需二十几万美元外汇。由于超精密磨削涉及的技术比较复杂,国内数家单位耗巨资引进的磨头系统至今仍未有效地使用起来。本课题通过开发高刚性、超精密(0.1 μm)磨头系统以及对相关应用技术的掌握,将推动我国的非球面超精密磨削技术的发展。

(5) 开放式高性能数控系统集成技术

目前,国内还没有开发出适合非球面超精密

加工机床的商品化高性能数控系统。因此,课题所需的数控系统只能自行开发。课题研制的非球面超精密加工机床数控系统采取了用工控 PC + DSP 多轴运动控制器构成的开放式数控系统进行系统集成方式实现,走出了一条适合我国超精密机床发展的开放式高性能数控系统集成技术开发及应用的道路。

(6) 非球面面形检测技术

非球面面形检测技术是非球面超精密加工技术中的一大关键技术。本课题研制成功了相移式横向剪切干涉法测量光学非球面面形的检测装置及其配套检测软件,实现了对部分非球面光学零件精度为 0.1 μm 面形测量。

6 结 论

该课题在非球面曲面超精密加工设备和工艺的关键技术方面取得了一系列重要突破,研究成果填补了国内空白,使我国超精密加工技术水平跃上了一个新的台阶,研究水平进入了国际先进行列。目前,我国航空航天、兵器、核工业等部门都提出了对非球面曲面等类型零件的超精密加工设备及技术需求,该项研究成果为我国国防科研与武器装备生产所急需的超精密加工设备和技术提供了技术储备。该课题的研究成功,还为“九五”预研成果的工程化打下了坚实的理论和技術基础,可以有效地促进我国非球面曲面的超精密加工与测量整体技术的跨越式发展。

参考文献:

- [1] PNEUMO T H. Nanoform 250 Preliminary Engineering Specifications[Z]. Revision.
- [2] POWELL J W. *Design of aerostatic bearing* [M]. The Machinery Publishing Co, Ltd, 1970.
- [3] BRZESKI L, KAZIMIERSKI Z. High stiffness bearing[J]. *Tran of the ASME*, 1979, 101: 520-525.
- [4] TANG I C, GROSS W A. Analysis and design of externally gas bearing[J]. *ASLE Trans*, 1962, 27: 261-284.
- [5] 庞滔,郭大春.超精密加工技术[M].北京:国防工业出版社,2000.
PANG T, GUO D Ch. *The ultraprecision machining technology* [M]. Beijing: Natinal Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [6] 袁哲俊,王先逵.精密和超精密加工技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
YUAN Zh J, WANG X K. *The precision and ultraprecision machining technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)

Ultraprecision machining equipment and technology of aspheric optics

LUO Song-bao ,ZHANG Jian-ming

(No. 1 laboratory , No. 303 Research Institute of
China Aviation Industry Corporation , Beijing 100076 , China)

Abstract : Nanosys-300 aspheric optical components ultraprecision machining system is one of the major research achievements in search for ultraprecision machining and measuring technology for aspheric components during the 9th five-year plan. The major achievements in search for ultraprecision machining system , machining technology and measuring technology for optical components , and design and manufacturing of aspheric optical components ultraprecision machining system , high speed ultraprecision aerostatic air bearing spindle system , ultraprecision closed hydrostatic oil bearing slides , high speed ultraprecision aerostatic air bearing electrical grinder spindle system , open high performance CNC system integration technology in particular , are reviewed in detail.

Key words : aspheric optics ; ultraprecision machining ; measurement

作者简介 : 罗松保 (1968 -) ,男 ,湖南邵东县人 ,工学博士 ,高级工程师 ,研究方向为超精密加工技术及设备 ;

E-mail :luosongbao @doctor.com.cn Tel :010-68380521-4399

张建明 (1955 -) ,男 ,上海市人 ,工学硕士 ,研究员 ,研究方向为超精密测量与控制技术。