

文章编号 1674-2915(2011)06-0537-09

# 单点金刚石机床及其在光学工程领域的应用

巩岩, 赵磊

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**介绍了单点金刚石车床概念,总结回顾了单点金刚石车床在国防和商业领域内的发展状况,给出了目前商用单点金刚石车床的典型产品。对单点金刚石车床的关键零部件和核心技术,如空气静压主轴、液压导轨、直流电机、对刀装置、误差补偿和自适应控制等进行了分析。最后,介绍了适宜单点金刚石车削加工的材料,分析了快刀伺服和慢刀伺服在光学元件中的应用以及所加工的光学元件在国防和商用光电产品中的应用,并以主次镜望远镜系统和精密光学系统无调整装配为例,说明了单点金刚石车削在光电产品中的重要作用。

**关键词:**超精密机床;单点金刚石车削;光学元件

**中图分类号:** TG518.3; TH703 **文献标识码:** A

## Single point diamond machines and their applications to optical engineering

GONG Yan, ZHAO Lei

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** This paper overviews the development of the single diamond machines used in weapons and commercial fields, and introduces nowadays widely-used commercial ultra-precision diamond turning machines. Then, it analyzes the key techniques to achieve nanometer-level precision machining, such as air bearing work spindles, oil hydrostatic bearing X/Z slides, work piece measurement & error compensation, optical tool setters, Linear Variable Differential Transformer (LVDT) tool setters and adaptive control systems. Finally, it summarizes the materials suitable for diamond turning, and introduces the fast tool servo and slow slide servo used in the manufacturing of opto-mechanical components. By taking drop-in assembly of a Cassegrain telescope and an fine optical system for examples, this paper shows the important effort of the ultra-precision diamond turning in photoelectric products.

**Key words:** ultra-precision machine; Single Point Diamond Turning (SPDT); optical component

收稿日期:2011-09-21;修订日期:2011-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40974110)

## 1 引言

超精密单点金刚石机床是加工高精精密光学元件的基础装备,其定义如下:(1)采用单点金刚石刀具;(2)机床的导轨运动精度小于 $1\ \mu\text{m}$ ,主轴回转误差小于 $50\ \text{nm}$ ,控制和检测反馈的分辨率小于 $10\ \text{nm}$ ;(3)零件加工的尺寸精度控制在亚微米量级,面型精度优于 $100\ \text{nm}$ ,表面粗糙度优于 $5\ \text{nm}$ ;(4)机床具有良好的热稳定性、高刚度,并且具备自适应控制功能<sup>[1]</sup>。单点金刚石车床主要用于加工中小尺寸、中等批量的红外晶体和金属材料的光学零件,其特点是生产效率高、加工精度高、重复性好,适合批量生产,加工成本比传统的加工技术明显降低。

近年来,随着对激光核聚变、同步加速器、天文望远镜、打印机、摄像机、硬盘等产品需求的快速增长,单点金刚石车床在光学工程领域的应用日益广泛,对其理论基础与应用领域的研究也受到众多学者的关注。

本文首先分析了单点金刚石车床在国防和商业领域的发展状况和发展趋势,介绍了目前国际上的典型商用产品;然后对超精密单点金刚石车床的核心零部件进行了阐述;最后,介绍了单点金刚石车床在国防和商用光电产品中的应用。

## 2 金刚石切削技术的发展

采用金刚石车削技术加工光学元件的最早记载可以追溯到第二次世界大战期间,Cooke<sup>[2]</sup>和Eindhoven等人<sup>[3]</sup>分别采用金刚石车削技术加工施密特圆盘模具。20世纪50年代,Taylor & Hobson研制了用于生产高质量摄像机镜头的金刚石机床<sup>[4]</sup>。同期,Bell & Howell公司开始进行非球面光学零件加工技术的研究<sup>[5]</sup>。1972年,美国Union Carbide公司研制成功R- $\theta$ 非球面加工机床<sup>[6]</sup>。1980年,英国Rank Pneumo公司向市场推出两轴联动式商用MSG-325金刚石车床<sup>[6]</sup>。同年,Moore公司研发了M-18AG非球面加工机床,可加工直径为 $356\ \text{mm}$ 的各种非球面金属反射镜<sup>[6]</sup>。1983年和1984年,美国劳伦斯利弗莫尔

国家实验室(LLNL)分别研制成功加工直径为 $2.1\ \text{m}$ 的卧式金刚石车床DTM-3<sup>[7]</sup>和加工直径为



图1 美国的LODTM立式金刚石车床

Fig.1 LODTM vertical diamond machine made in the USA

$1.65\ \text{m}$ 的LODTM立式金刚石车床<sup>[8]</sup>,其中LODTM立式金刚石车床被公认为世界上精度最高的超精密机床,如图1所示。1991年,英国Cranfield大学精密工程研究所(CUPE)研制成功OAGM2500数控机床,可加工和测量精密自由曲面,采用加工件拼合方法,能加工出用于天文望远镜的直径为 $7.5\ \text{m}$ 的大型反射镜<sup>[9]</sup>。

当前国际上单点金刚石机床的主要发展趋势是:(1)在尖端技术和产品的需求下,加工精度向加工极限方向发展,已进入亚微米级及纳米级加工;(2)随着微电子产品市场越来越大,对机床的效率和自动化程度要求越来越高;(3)机床结构不断向多功能模块化的方向发展;(4)机床功能不断向加工检测补偿一体化的方向发展。

目前国际上主要生产商用金刚石超精密加工设备的厂商有:美国Moore公司、AMETEK集团旗

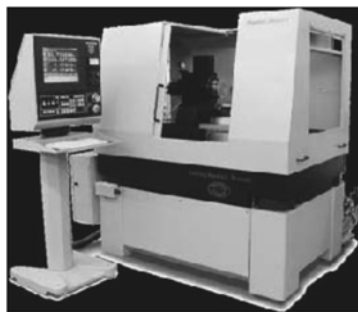


图2 Moore公司的Nanotech 450UPL

Fig.2 Nanotech 450UPL made by Moore Company



图3 Precitech公司的Nanoform 700 ultra  
Fig.3 Nanoform 700 ultra made by Precitech Company



图4 LT Ultra公司的MTC400  
Fig.4 MTC400 made by LT Ultra Company

下的 Precitech 公司和 Taylor Hobson 公司,日本的东芝机械公司、丰田工机公司和德国的 LT Ultra 公司等。图 2 ~ 图 4 为几款典型的超精密单点金刚石机床产品,分别为 Moore 公司的 Nanotech 450UPL、Precitech 公司的 Nanoform 700 ultra 和 LT Ultra 公司的 MTC400。

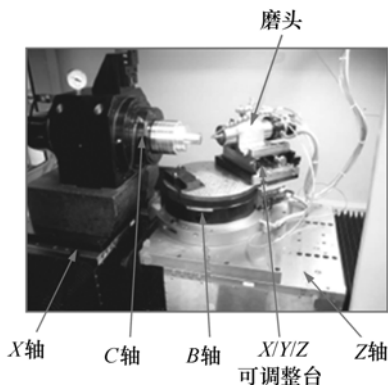


图5 配有 XZCB 和磨头的金刚石机床  
Fig.5 Diamond machine with XZCB and grinding spindle

上述商用单点金刚石车床标配有 X 轴/Z 轴工作台以及空气静压主轴,并且可以通过附加旋转 C 轴和旋转 B 轴扩展为 4 轴联动系统。同时单点金刚石机床还可以增加铣头、磨头或者快刀伺服装置。图 5 所示为配备了旋转 B 轴、旋转 C 轴和水平面内与主轴成 45°角分布磨头的 5 轴联动机床。

### 3 超精密单点金刚石机床的共性技术与关键零部件

为实现光学元件的超精密加工,单点金刚石机床系统集成了先进的空气静压主轴、液压导轨、直线电机、自适应数控系统等关键零部件和核心技术。

#### 3.1 床身与隔振装置

为了增加超精密机床的静刚度和动刚度,床

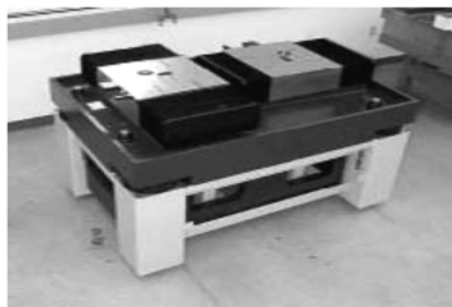


图6 Nanotech 450UPL的床身与隔振系统  
Fig.6 Base and vibration isolation system of Nanotech 450UPL



图7 Nanoform 700 ultra的床身与隔振系统  
Fig.7 Base and vibration isolation system of Nanoform 700 ultra

身由整块的天然花岗岩构成,由4个主动气浮隔振结构支撑。机床标配有两个相互独立的直线运动轴 $X$ 轴和 $Z$ 轴,它们在水平面内呈T形结构放置,有利于提高机床的闭环刚度。 $X$ 轴工作台上安装了超精密静压空气主轴, $Z$ 轴工作台用于安装各种刀架、可附加的磨头/铣头、快刀伺服装置、慢刀伺服装置和旋转 $B$ 轴等<sup>[10]</sup>。图6和图7分别为Nanotech 450UPL和Nanoform 700 ultra的床身和隔振系统。

### 3.2 超精密液压导轨与直流电机驱动技术

金刚石机床标配的 $X/Z$ 工作台均采用直线电机作驱动,静油压导轨进行导向,如图8所示,相对传统的丝杠与电机直联方式,这种方式能够有效提高运动精度;导轨为非接触式导轨,有效降低了工作台运动过程的摩擦和阻尼。工作台采用光栅尺或激光干涉仪进行位置的实时检测,由于铸铁工作台与微晶玻璃光栅尺的热膨胀系数相差很大,故将光栅尺安装在钢固定套上,然后再将其固定在工作台上来降低温度变化对位置检测的影响。

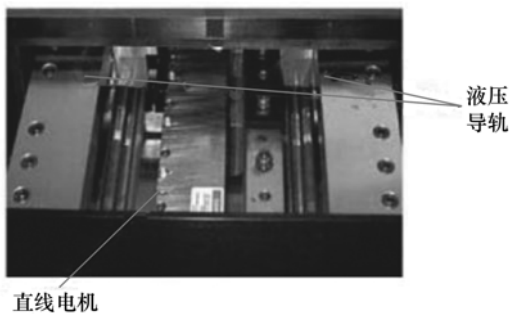


图8 液体静压导轨与电机直驱技术

Fig. 8 Oil hydrostatic bearing slide and linear motor

### 3.3 超精密空气静压主轴

相对于液体静压主轴,机床采用空气静压主轴的形式,从而提高了回转精度。空气静压主轴由硬化不锈钢轴和青铜轴套构成,主轴通过高精度研磨机床无心磨削加工而成,为满足垂直度和平行度要求,主轴外圆面和止推轴承外表面一次装夹加工完成。为降低转动产生的热变形对主轴性能的影响,在前后轴承以及中间的电机处均设有水冷循环装置。直流无刷式电动机、速度反馈编码器和 $C$ 轴位置编码器与主轴安装为一体,通

过软件系统中配置的主轴与 $C$ 轴间的转换程序,可以方便地实现两轴之间的更换。图9和图10分别为Nanotech 450UPL和Nanoform 700 ultra采用的主轴,其径向端跳分别优于25 nm和50 nm。



图9 Nanotech 450UPL 的主轴 PI ISO 5.5

Fig. 9 PI ISO 5.5 air bearing spindle of Nanotech 450UPL



图10 Nanoform 700 ultra 的主轴 HD-160

Fig. 10 HD-160 air bearing spindle of Nanoform 700 ultra

### 3.4 旋转 $B$ 轴

机床采用液体静压旋转 $B$ 轴,采用无刷直流电动机作为驱动,并且集成有高分辨率编码器和制动器。 $B$ 轴可以根据需要锁定或旋转。 $B$ 轴旋转时,需提升 $X$ 轴以增加机床的系统刚度。 $B$ 轴上带有T形槽,可以将刀具、检测装置和快刀伺服装置等固定其上。

### 3.5 超精密机床的自适应数控系统

超精密机床数控系统的特点是高编程分辨率和高精度的伺服控制软硬件环境。在高编程分辨率条件下实现高质量切削,需要很高的控制速度,相应地对插补周期和伺服闭环采样周期提出了更高的要求<sup>[11]</sup>。

Moore 公司开发的 Delta Tau 运动控制系统、Precitech 公司自行研制的 UPx 控制系统都具备自适应控制功能。控制系统可以在机床上运行特定的加工任务,也可以实时连续地调整伺服控制参数,并且具有主动取消重复误差源等功能。

### 3.6 工件在线测量和误差补偿装置

超精密金刚石机床配备有在线测量和误差补偿装置(WECS),能够对光学表面进行在线测量和修正。WECS 工作时,通过安装在 Z 轴或 B 轴上的气浮线性可调差动变压器(LVDT)探头对工件表面进行测量,获得加工面的实际数据,然后通过理论与理论加工表面进行比较进而确定去除量,修正后的工件面形精度可以达到亚微米级。

### 3.7 精密光学对刀装置和 LVDT 对刀装置

为了准确测量刀尖的空间相对位置和刀尖的圆弧半径,在超精密金刚石机床中配有立式显微镜光学对刀装置或 LVDT 对刀装置。

光学对刀装置如图 11 所示,立式显微镜采用运动学精密定位方式安装在主轴壳体的顶部,以保证每次拆装时的重复定位精度。刀尖的垂直位

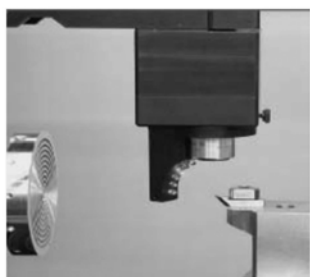


图 11 光学对刀装置  
Fig. 11 Optical tool setter

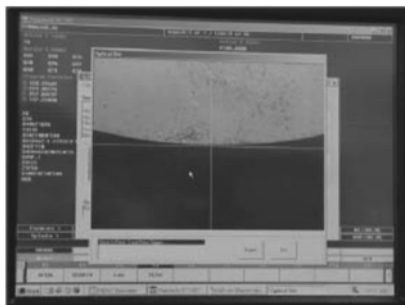


图 12 光学对刀软件  
Fig. 12 Software of optical tool setter

置由可调焦显微镜的焦平面确定,刀尖的水平位置由软件十字线以及主轴中心线精确定位,如图 12 所示,刀尖的圆弧半径通过 3 次测量确定。由于光学对刀装置增加了 LED 照明装置,可精确测量负前角刀具位置和刀尖半径。

LVDT 对刀装置如图 13 所示,它可用于金刚石刀具相对位置和刀尖半径的测量,以及磨削砂轮位置和大小形状的测量。对刀时,一个 LVDT 探头测量刀尖圆弧在 X、Z 平面内的空间位置和 X、Z 平面内的刀尖圆弧半径,另一个探头用于测量刀尖的高度,即 Y 方向坐标值<sup>[12]</sup>。LVDT 对刀为接触式对刀,相对于光学非接触对刀方式,对精密刀尖存在一定的损坏性。

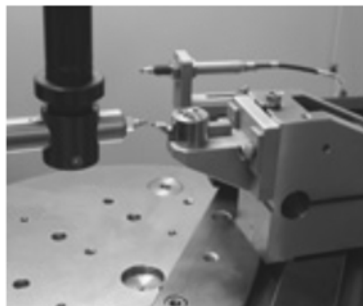


图 13 LVDT 对刀装置  
Fig. 13 LVDT tool setter

## 4 超精密单点金刚石机床在光学工程领域的应用

适用于单点金刚石车削加工的材料主要有:

(1) 铝、黄铜、镀镍材料、金、银等有色金属;(2) 锗、硫化锌、硒化锌、硅、氟化钙、硫化锌、碲镉汞、铋化镉等红外光学晶体材料;(3) 聚碳酸酯、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等聚合物<sup>[9]</sup>。图 14 所示为采用单点金刚石车削(SPDT)加工的各种材料光学元件。其它一些材料如 BK7、熔石英、SF12 等玻璃材料,WC、SiC 等陶瓷材料和钢铁等不能直接采用金刚石车削加工,但这些材料可以通过金刚石机床上选配的磨头或铣刀头来进行加工。

单点金刚石车床通过配置快刀伺服系统(FTS)和慢刀伺服系统(SSS),可以进行三轴联动以实现各种自由曲面的加工。

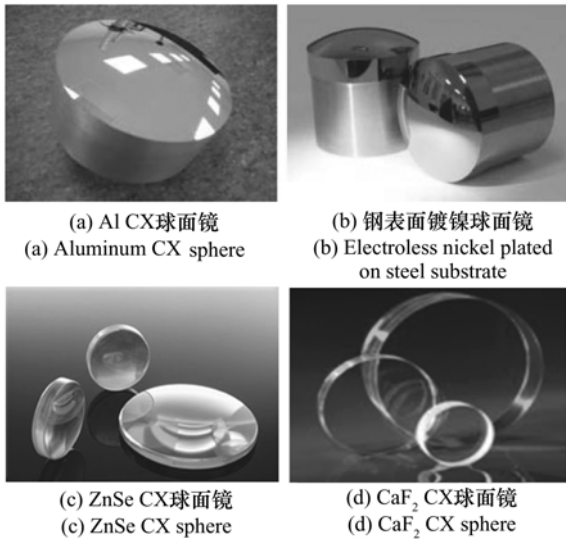


图 14 金刚石车削加工的各种材料光学元件

Fig. 14 Optical components with different materials by using diamond turning

FTS 如图 15 所示,它包括一个装在 Z 轴上的短行程执行机构,工作时 X 轴、C 轴和短行程执行

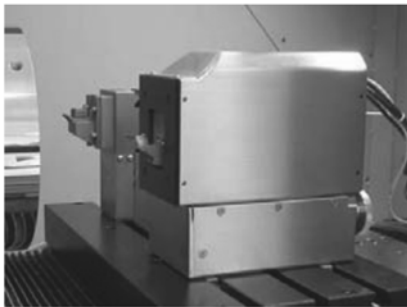


图 15 快刀伺服系统

Fig. 15 Schematics of FTS system

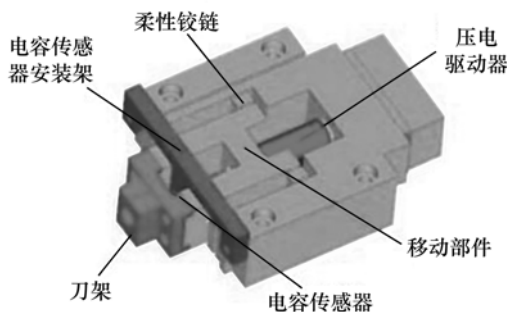


图 16 一种快刀伺服装置示意图

Fig. 16 Schematics of a FTS mechanism

机构三轴联动,其中执行机构由压电(PZT)驱动或带闭环位置反馈的直线电动机驱动。图 16 所示为一种执行机构示意图,机构由 PZT 驱动,通过柔性铰链组成的柔性机构进行运动的传递,并通过在末端安装电容传感器形成运动闭环<sup>[13]</sup>。FTS 可实现各种自由曲面的车削加工,如微棱镜、透镜阵列、环面以及小离轴量的(不超过 mm 量级)离轴非球面的加工。图 17 为采用快刀伺服装置加工的透镜阵列。

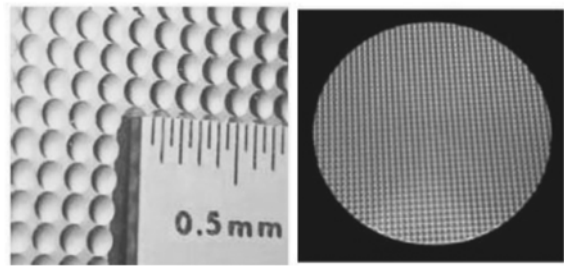


图 17 快刀伺服加工的透镜阵列

Fig. 17 Lens array products processed by FTS

慢刀伺服系统如图 18 所示,同样可以加工环面、离轴非球面和渐进式透镜等各种自由曲面。由于慢刀伺服时 X 轴、C 轴和 Z 轴三轴联动,可以加工离轴量较大的非球面,并且相对于快刀伺服装置,其自由曲面的加工精度更高。图 19 为采用慢刀伺服加工的各种光学元件。

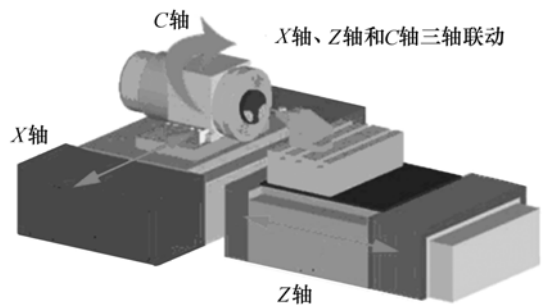


图 18 慢刀伺服系统示意图

Fig. 18 Schematics of SSS system

金刚石车床加工的光学元件在军用和民用光电产品中的应用非常广泛。军用光电武器产品大都装备有各种各样的光电传感器件,而这些光电传感器件或多或少采用了各种形式的红外光学元件,尤其是军用激光和红外热成像产品对红外光

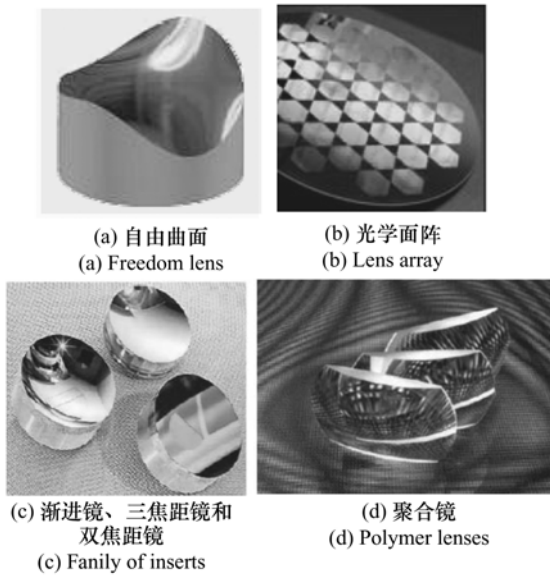


图 19 慢刀伺服加工的各种光学元件

Fig. 19 Optical component products processed by SSS

学元件有大量的需求。例如 AN/AVS26 飞行员夜视眼镜就采用了 9 块非球面光学元件和 2 块球面光学元件<sup>[14]</sup>。在民用光电产品中,采用金刚石车削的光学元件也发挥着核心零部件的功能,比如激光打印机中的多面棱镜,复印机中的硒鼓,硬盘中的磁头,摄像机中的镜头和取景器,显示器中的 Fresnel 透镜,手机中的嵌入式镜头,高能激光器中的反射镜,光通信中的光纤球端,医疗仪器中的 He-Ne 激光聚焦校正器等。另外,还可以采用金刚石车削技术加工各种光学零件的成型模具和高精度光机结构件,比如液晶屏中的导光板模具,照相机、CD、DVD 中的非球面透镜模具,全息光学元件模具,高精密望远镜、显微镜、光刻投影物镜中的光机接触界面等。

图 20 和图 21 为采用 SPDT 的一种望远镜系统,系统中的所有光机零件均采用 6061 铝,在加工主镜、次镜以及与次镜支撑架的接触界面时均采用了 SPDT 技术。结果表明:光学零件与光机接触界面的精度足够高,无需调整便可满足预期的系统性能指标,简化了装配过程<sup>[15]</sup>。

SPDT 通过增加磨削、铣削附件或采用陶瓷刀具,可以加工各种硬脆材料的光学零件;通过与离子束抛光技术相结合,可以加工高精度非球面光学零件;通过与环氧树脂复制技术和镀膜工艺相

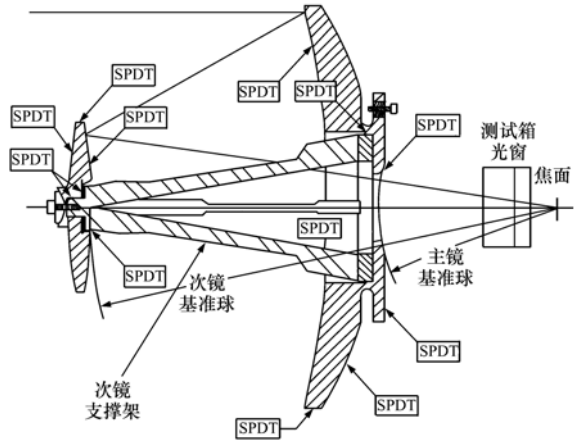


图 20 采用单点金刚石车削的全铝材料望远镜示意图

Fig. 20 Schematic diagram of an all-aluminum telescope machined by SPDT method

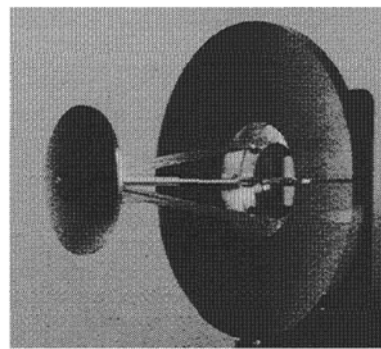


图 21 安装好的望远镜

Fig. 21 Assembled telescope

结合,可批量生产精密非球面反射镜和透镜;通过与中心偏检测仪结合,可以实现光学元件的无调整精密装配。

采用 SPDT 实现无调整装配的关键在于镜框与镜片的同心以及镜框配合面的精确加工。图 22 和图 23 分别为镜框和镜片的两种定心车削方式。方式 1 如图 22 所示,首先将镜片和镜框采用环氧树脂粘接在一起,然后通过 Z 向调整装置、X/Y 向调整装置和 tip/tilt 调整装置实现镜片光轴与机床主轴的重合,进而加工镜框的上、下表面及外圆定位面。方式 2 如图 23 所示,首先将镜片安放在机床专用夹具上,通过镜片的自身重力进行调心以保证镜片光轴与机床主轴重合,并采用黏合剂将镜片与专用卡盘粘接,然后将镜框安

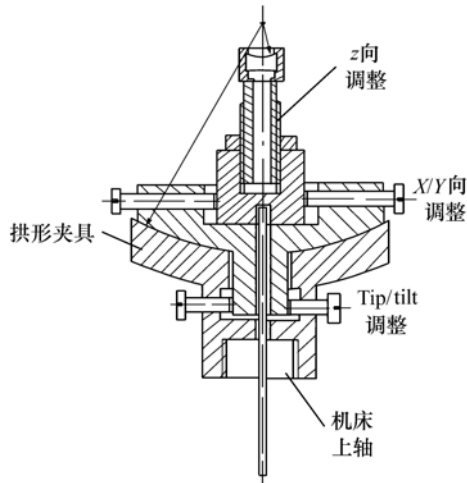


图22 金刚石定心车削方式1

Fig. 22 A method of centering a lens in a cell by using SPDT

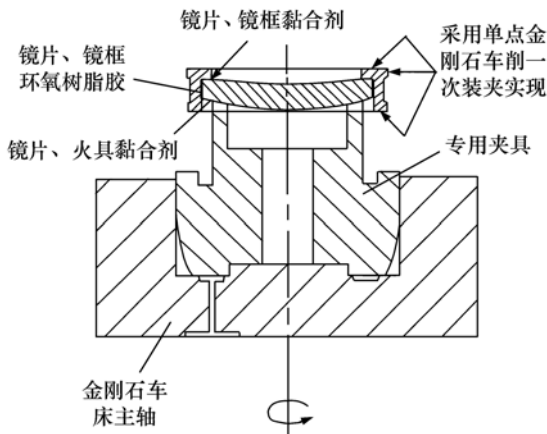


图23 金刚石定心车削方式2

Fig. 23 Another method of centering a lens in a cell by using SPDT

放在镜片上,并采用黏合剂将镜框和镜片粘接,进而将专用卡盘和镜框、镜片整体卸下反转,通过镜框的注胶孔注入环氧树脂胶将镜片和镜框粘接固定,最后加工固定好的镜框组件上、下表面及外圆定位面<sup>[16-17]</sup>。其中,方式1采用了金刚石车床和中心偏检测仪结合的方式,适合于各种形状镜片的定心。方式2仅采用了金刚石车床,但仅限于

#### 参考文献:

- [1] DAVIES M A, EVANS C J, PATTERSON S R, *et al.*. Application of precision diamond machining to the manufacture of

利用自重进行调心的镜片和相应的镜框结构设计。

按照上述方法依次完成了各个镜框和镜片的定心车削,并采用 SPDT 技术加工镜筒的配合内表面,最后将加工好的镜框单元依次放入镜筒中,整个过程无需调整,仅依靠结构件的 SPDT 高精度加工保证偏心和间隔要求,简化了装配的过程,图 24 为一种光学系统无调整装配的示意图。

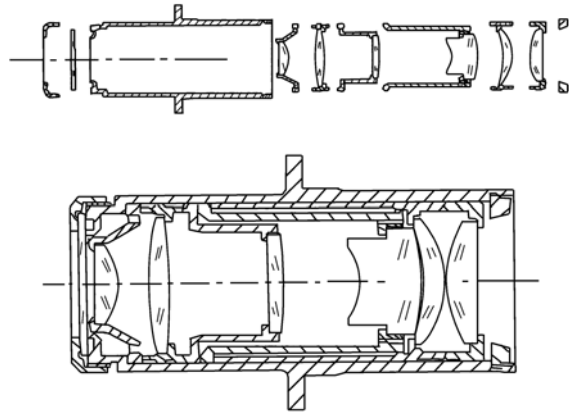


图24 光学系统的无调整装配

Fig. 24 Drop-in assembly of an optical system

## 5 结束语

单点金刚石机床是实现精密/超精密加工的关键装备,尤其是在航空宇航、国防军事、微电子等领域的核心光电产品制造方面发挥着重要的作用。本文介绍了单点金刚石机床发展情况和现状,分析了单点金刚石机床的关键零部件和核心技术,并以主次镜望远镜和金刚石定心装配为例阐述了单点金刚石机床在光电产品中的应用。不难看出,随着单点金刚石车削技术在光学工程领域越来越广泛的应用,单点金刚石机床将向着高效高精度加工、加工检测一体化、大型结构与微纳结构加工等高技术趋势发展,从而突破现有加工精度和加工范围的局限,将我国精密加工技术提升到世界先进水平。



- micro-photonics components[J]. *SPIE*,2003,5183:94-108.
- [2] EVANS C. *Precision Engineering;An Evolutionary View*[M]. Bedford:Cranfield Press,1989.
- [3] GIJSBERS T G. Some aspects of precision machine within Philips[J]. *SPIE*,1984,508:26-30.
- [4] HORNE D F. Testing time for aspherics[J]. *Precision Eng.*,1981,3(2):59-59.
- [5] BENJAMIN R J. Diamond turning at a large optical manufacturer[J]. *Opt. Eng.*,1978,17(6):574-577.
- [6] 杨福兴.非球面零件超精密加工技术[J].航空精密制造技术,1997,33(5):4-7.  
YANG F X. Ultra precision machining technology of aspheric parts[J]. *Aviation Precision Manufacturing Thechnol.*, 1997,33(5):4-7. (in Chinese)
- [7] BRYAN J B. Design and construction of an 84 inch diamond turning machine[J]. *Precision Eng.*,1979,1(1):13-17.
- [8] MEINEL A B,MEINEL M P,STACEY J E,et al.. Wavefront correctors by diamond turning[J]. *Appl. Opt.*,1986,25(6):824-825.
- [9] LEADBEATER P B. A unique machine for grinding large off-axis optical components;the OAGM2500[J]. *Precision Eng.*,1989,11(4):191-196.
- [10] ZONG W J,LI Z Q,SUN T,et al.. The basic issues in design and fabrication of diamond-cutting tools for ultra-precision and nanometric madining[J]. *International J. Madine Tools and Manufacture*,2010,50(4):411-419.
- [11] 李圣怡,戴一帆.超精密加工机床新进展[J].机械工程学报,2003,39(8):7-14.  
LI SH Y,DAI Y F. New development of the ultra precision machine tool[J]. *Chinese J. Mechanical Eng.*,2003,39(8):7-14. (in Chinese)
- [12] 罗松保,张建明.非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J].光学精密工程,2003,1(1):75-78.  
LUO S B,ZHANG J M. Ultra precision machining equipment and technology of aspheric optics[J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,1(1):75-78. (in Chinese)
- [13] KIM H S,KIM E J,SONG B S. Diamond turning of large off-axis aspheric mirrors using a fast tool servo with on-machine measurement[J]. *J. Materials Processing Technol.*,2004,146(3):349-355.
- [14] 康战,聂凤明,刘劲松,等.单点金刚石精密数控车削加工技术及发展前景分析[J].光学技术,2010,36(2):163-167.  
KANG Z,NIE F M,LIU J S,et al.. Research on single point diamond precision numerical control turning technique and its development[J]. *Opt. Technique*,2010,36(2):163-167. (in Chinese)
- [15] ERICKSON D J,JOHNSTON R A,HULL A B. Optimization of the optomechanical interface employing diamond machining in a concurrent engineering environment[J]. *SPIE*,1992,CR43:329-363.
- [16] EDMUND W A. Diamond turning assisted fabrication of a high numerical aperture lens assembly for 157 nm microlithography[J]. *SPIE*,2003,5176:36-43.
- [17] YODER P R,Jr. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. Washington:SPIE Press:259-264.

作者简介:巩 岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,博士生导师,主要从事精密光学仪器、光机电一体化技术方面的研究。E-mail:gongy@sklao.ac.cn  
赵 磊(1982—),男,山东临沂人,工学硕士,助理研究员,主要从事光机结构的设计、仿真、精密加工等方面的研究。E-mail:zhaol@sklao.ac.cn