

# 我国超精密加工设备的产业化进程

杨 辉

(中航工业北京航空精密机械研究所,北京 100076)

[摘要] 我国机床制造业在世界上已经占有一席之地,但生产的绝大多数依然是普通级精密机床,而超精密加工设备尚未达到工业化生产水平,一些关键元部件还依赖进口,自主研制价格高、周期长,缺乏精度稳定性和设备运行的长期稳定性。应在重视超精密基础元部件研发的基础上,联合国内优势单位组建超精密加工设备产业化研发和生产基地,加强超精密加工设备产业化开发,满足国家重大型号任务的需求。

关键词:超精密无器件;模块化设计;单类金刚石切削;计算机控制光学表面成形

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.036



杨 辉

博士、研究员,中航工业精密超精密及微细加工技术首席专家,长期从事武器装备国防预研及应用技术研究,在精密超精密基础元部件及设备集成技术、超精密加工工艺研究等方面具有较深的造诣。

光学表面制造技术,特别是中大口径光学元件的加工,由于其材料的特性和光学本身对精度要求的严格性,导致了其几个世纪以来发展缓

慢,且严重依赖操作者的经验和技巧。传统光学加工技术是在17世纪牛顿开发的平、球面镜加工技术基础上发展而来的,基本原理是磨具与镜面在全口径范围接触下的相对研磨和抛光,其加工效率低、加工周期长、质量不稳定,且难以加工相对孔径大于1:2的镜面。这种加工工艺不苛求加工设备本身的精度(此时机床只是起到运动传递的作用),而更多地依赖于人工经验,被称为非确定性超精密加工工艺。

随着现代科技的发展,由于光学元件几何尺度的极端性、材料的多样性、形面的复杂性使传统的非确定性超精密加工工艺和设备已不能适应现代光学元件加工的需求。随着机床功能部件精度的提高以及计算机控制技术的发展,确定性超精密加工工艺和加工设备的出现有效地解决了上述问题。当今主流的超精密加工设备主要是指确定性超精密加工设备,按照设备精度、加工方式和加

工工艺分可以分为以下两大类,这两类设备采用不同的超精密工艺都能达到亚微米或更高的零件精度。

第一类是指利用轨迹可控的刀具(如单晶金刚石刀具、砂轮等),以极高的空间运动精度完成具有光学元部件的加工,典型的设备如单点金刚石超精密车床、超精密铣床、超精密磨床等,这类超精密加工设备的主轴及导轨均采用液体静压或空气静压轴承,一般主轴回转精度小于 $0.1\mu\text{m}$ ,导轨运动直线度 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}/300\text{mm}$ ,运动分辨率可达 $1\text{nm}$ ,此类设备也可称为运动复印型设备,即将设备的运动精度复制到被加工工件上。需要通过控制影响部件精度的各因素才能达到超精密数控机床最终的精度,而这些影响因素通常要求做到极限:如机床的机械功能部件、机床位置检测反馈系统、伺服运动控制系统以及设备总体等必须具有极高的精度、极好的动静态特性、极高的数据处理和实时控制

能力、极高的稳定性、极严格的环境要求等。

第二类是指基于计算机控制光学表面成型技术(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)的超精密加工设备,这类超精密加工设备与第一类相比精度要求较低,主轴及导轨一般均采用机械滚动轴承,运动精度及定位精度均在0.01mm量级,典型的基于CCOS的超精密研抛设备包括小磨头抛光设备、应力盘抛光设备、气囊抛光设备、磁流变抛光设备、离子束抛光设备等<sup>[1]</sup>。在此类设备进行的超精密加工工艺是随着测量测试、计算机控制等先进技术的发展,从20世纪70年代开始相继发展的用数学模型描述工艺过程、以计算机数控技术为主导的先进光学制造技术,其原理是利用可控的去除函数,在相对确定的位置进行确定量的材料去除,从而得到高精度高质量的产品。

上述两类设备构成了当今通用超精密数控加工设备的主体,也代表了一个国家超精密加工技术研究和应用的水平。通用精密加工设备一般由各大机床制造厂商提供货架式商品,用户根据加工需求进行选择订购。如果用户有特殊加工需求,如加工件的规格尺寸、材料、工艺等方面

的特殊要求,可以由机床厂商为之量身设计制造专用设备,对于超精密加工设备也有类似情况。与精密加工设备相比,生产通用性超精密加工设备的厂商较少,在全世界范围内仅有几十家,大部分集中在美国、欧洲和日本。而到目前为止,国内还没有一家专业化超精密加工设备生产厂商。美国 Moore 公司、Precitech 公司等生产的超精密切削设备,SatisLoh 公司、Optech 公司生产的光学铣、磨、抛设备等都属于通用设备,这些机床具备齐全的功能和较高的精度,但价格较昂贵。而专用的超精密加工机床,如磁盘车床、KDP 晶体超精密飞切加工机床、大口径非球面反射镜研抛机等。这种机床结构较为简单,价格相对便宜,但功能单一,可加工零件种类较少,而且需要单独专门设计,研制周期长、不能快速响应用户的需求。

### 国内超精密加工机床的发展及应用

生产母机精度的不断提高是产品精度与质量提高的保证。以单点金刚石车削为例,第一代超精密车削加工技术是20世纪60年代由美国发展的金刚石刀具及气体、液体静压轴承及导轨技术等推动发展起来的。

其标志性成果是1984年美国劳伦斯利弗摩尔国家实验室(LLNL)研制的大型超精密金刚石车床(LODTM),以及以大型非球面光学零件超精密加工为目标的超精密机床研究计划——POMA(Point One Micrometer Accuracy)计划的推进。进入21世纪,第二代的超精密单点金刚石车床采用了直线电机驱动及快刀伺服技术等,使超精密车削加工技术发展至非回转对称及微结构自由曲面等加工,设备的精度也有所提高。

自20世纪80年代,国内有关单位在研制气体静压主轴及导轨等基础上开始了单点金刚石切削加工设备的开发,90年代初北京机床研究所、北京航空精密机械研究所等陆续研制成功结构功能简单的超精密车床(图1)、超精密镗床等设备,可以进行平面、外圆及内孔等简单特征的超精密切削加工。

国内超精密加工技术发展的里程碑是非球面曲面超精密加工设备的研制成功。光学非球面零件由于具有优越的光学性能,可以提高成像质量并简化光路和结构,在军工及民用行业得到了广泛应用。当年只有欧美及日本等国能够制造非球面超精密加工设备,而国内引进受限且价格昂贵。于是非球面超精密加工



图1 超精密车床(1992年)  
Fig.1 Ultra-precision lathe (1992)

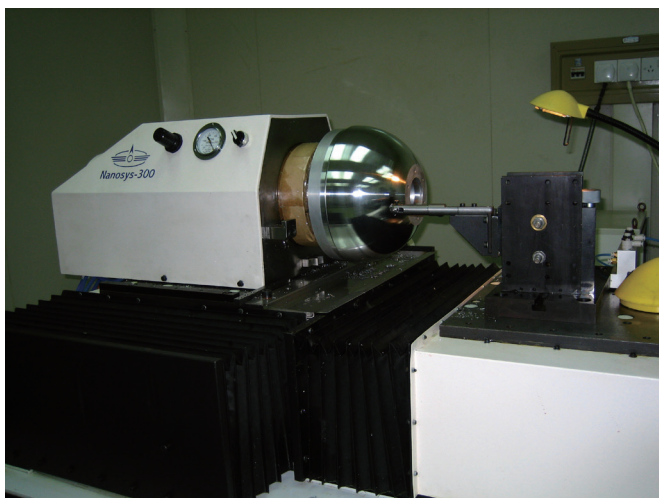


图2 非球面复合加工机床(2001年)  
Fig.2 Aspheric complex ultra-precision machine tool (2001)

设备的研制成为国家九五期间先进制造技术领域的重点任务,到九五末期,北京航空精密机械研究所、航天科技九院兴华机械厂以及哈尔滨工业大学等单位陆续研制成功代表当时国内超精密加工最高技术水平的非球面超精密切削加工设备(图2),打破了国外的技术封锁,随之国内超精密加工技术在惯性器件、光学制造等行业得到了较快的应用和发展,之后还陆续研制成功了中大口径的非球面超精密车床(图3)。由于国内超精密加工设备的发展,英、美等国陆续解除了该类型超精密装备对我国的禁运,并且设备价格一路下滑,这对国内的超精密基础部件研究和超精密加工装备研制产生了很大的冲击,使我国多数超精密装备研制单位并没有形成完整的基础研究能力与工程化及产业化规模。

随着产品功能和性能的进一步提高,从21世纪初开始对光学自由曲面、微小精密零件以及微结构功能表面等需求日益迫切,例如光学自由曲面能改善校正像差、改善像质、扩大视场等系统性能,同时能简化光学系统结构、减轻重量,因而已成为新一代光学系统的核心关键器件,特别在光学成像系统中在军工和民用领域具有广泛的应用背景;微结构功能表面的微结构具有纹理结构规则、

高深宽比、几何特性确定等特点,由于这些呈特定的拓扑结构分布的表面微结构使得元件具有某些特定的功能,如粘附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性等物理、化学性能等。例如,在航空、航天飞行器宏观表面加工出微纳结构形成功能性表面<sup>[2]</sup>,不仅可以减小飞行器的风阻、摩阻,减小摩擦,同时可避免结冰层形成,提高空气动力学、热力学功能以及突防能力,从而达到增速、增程、降噪、隐身等目的<sup>[3]</sup>。随着高精度传感器等器件结构的微型化、工作部位尺寸及形位精度等级的亚微米化,以及新型材料的应用,微小结构零组件装夹、定位、找正的精细化,刀具的小型化和加工进给量的微量、非接触面型和尺寸测量显微化等一系列技术难题对传统精密超精密加工设备及工艺也提出了严峻挑战。

原有的第一代超精密加工设备已经无法满足复杂结构特征的超精密加工需求,国内从事超精密加工技术研究的多家高校和研究所紧密跟踪国外的先进技术,在研究基于直线电机驱动的液体静压导轨、超精密位置伺服控制主轴、超精密数控系统及复杂曲面轨迹规划及编程等关键技术的基础上,研发了多轴超精密数控切削加工设备(图4),并开发了快速刀具伺服及慢拖板伺服超精密切削

加工等工艺,完成了太赫兹束控赋值曲面、微透镜阵列、双正弦曲面等典型复杂曲面和微结构特征的超精密加工,进一步缩小了与国外在超精密数控加工设备和工艺方面的差距。同时,针对典型产品的工程化应用,国内开发了超精密数控磨床、微结构特征大尺寸模辊超精密加工设备、振动切削刀架等,实现了典型模具材料的超精密加工,从而为实现光学功能元件的确定性、经济性与柔性大批量复制生产奠定了基础。

随着光学探测、空间遥感以及极大规模集成电路等领域的需求牵引,对大口径光学透镜及反射镜的高效超精密加工提出了要求。大口径高精度光学元件的制造一直是超精密加工技术的重要研究方向之一,确定性超精密研抛是其工艺原理。确定性超精密研抛技术也称为可控柔性加工技术,其基本原理是通过改变柔性研抛头的形状、压力、运动形式等参数,得到研抛头的去除函数,同时通过驻留时间的控制达到工件面型误差的收敛,最终提高工件面型精度和表面质量。确定量超精密研抛加工工艺技术的研究热点包括可控性良好的研抛新原理新方法、残余误差的定量去除算法、中高频误差控制和抑制技术等。高精度非球面光学零件(包括大型非球面镜、高陡度非球

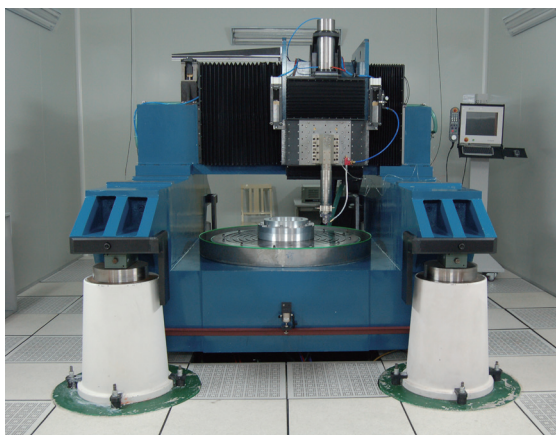


图3 中大口径非球面超精密加工机床(2012年)

Fig.3 Medium and large optic diamond turning machine tool (2012)

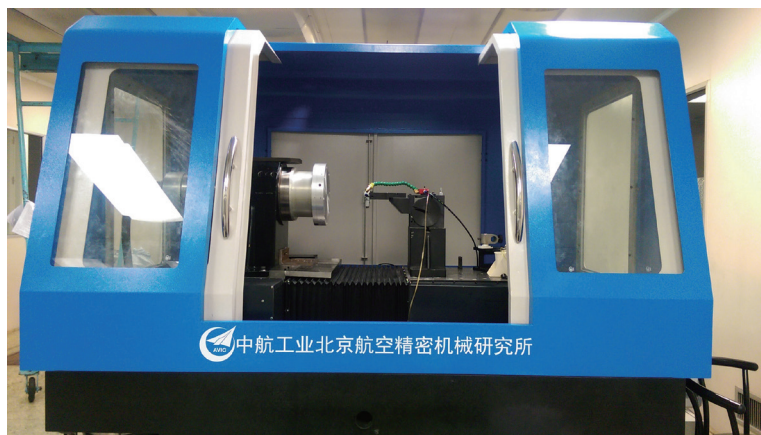


图4 多轴联动超精密加工机床(2013年)

Fig.4 Multi-axis ultra-precision machine tool (2013)

面镜、离轴非球面镜和拼接子镜、自由曲面镜等)的确定性超精密加工工艺及加工设备已成为超精密加工技术发展的重点之一。

近年来国内以空间遥感卫星相机的大口径光学透镜、激光核聚变楔形透镜、极大规模集成电路紫外/极紫外光刻机物镜等重大需求为牵引,高校、中科院及各军工集团的专业研究所等在小磨头抛光的基础上,研发了一系列超精密数控研抛加工工艺及设备,例如磁流变抛光<sup>[4]</sup>、离子束抛光、射流抛光、应力盘抛光和气囊抛光等,这些设备有的已接近国际先进水平,并得到了较好的工程化应用。

此外,在一些特殊的专业领域对超精密加工设备及工艺也提出了新的要求,例如近年来发展的抗疲劳制造技术与第一代成形制造技术及第二代表面完整性制造技术相比,可用于航空发动机主承力件、运动件以及连接件等关键构件(如齿轮、轴承、叶片、盘轴类零件、对接螺栓等)的制造,将会显著提高航空武器装备的使用寿命。抗疲劳制造技术的核心技术之一是精密超精密加工工艺,提高关键构件的加工精度及表面质量、控制加工工件表面完整性,提高构件的疲劳强度,改善表面应力状态及疲劳性能,最终提高零件的疲劳寿命<sup>[5]</sup>。普通精密数控加工设备已经无法满足航空关键构件的抗疲劳制造需求,针对不同材料、不同结构的航空构件需要采用超精密数控磨床、超精密数控加工中心等通用超精密加工设备,同时还需研发一些专用超精密加工设备,才能最终达到航空关键构件抗疲劳制造技术的要求。

### 超精密加工设备研发和生产现状及对策

通过多年来国内相关研发机构的努力,我国超精密加工设备的水平与国外相比,已经从 20 多年前的望

尘莫及到目前的望其项背,少数设备甚至能并驾齐驱。但是,也应看到我国在超精密数控机床领域尚未形成产业化,研制的专用机床或设备样机还无法大规模推广使用。我国数控超精密加工设备产业化方面存在以下不足:各单位各自为战,自主研发能力相对薄弱;功能部件发展滞后,对外依存度高,尚未形成较为齐全的专业化配套体系;缺乏超精密基础元部件及加工设备设计、制造专业化标准;设备精度保持性、运行可靠性及可操作性较差;设备的控制软件及系统开发能力较弱等<sup>[6]</sup>。为此,在今后超精密加工设备的研发和产业化生产中,应从以下方面加以关注:

(1) 重视超精密加工设备功能部件的研发,形成专业化的配套体系。

超精密车床、超精密磨床等超精密加工设备是利用主轴、导轨以及控制系统等超精密基础元部件的精度保证零件的加工精度,对于此类设备研发的关键是超精密基础元部件及其集成技术。国外超精密基础元部件都有专业的生产厂商,如英国 Loadpoint 公司专业生产超精密主轴、超精密导轨,德国 Hyprostatik 公司专业生产液体静压主轴、液体静压导轨以及液体静压丝杠等基础元部件,这些产品已经形成系列化、标准化。国内虽然具备了超精密基础元部件研制和生产能力,精度指标也达到了国外产品的水平,但在模块化、系列化、标准化等方面还存在差距,目前国内没有一家专业化生产厂家。国内生产的电机、编码器、光栅及多轴运动控制卡等在性能及可靠性等方面与国外存在较大差距,目前国内研制的超精密加工设备,检测及电控元器件基本依赖进口。

应继续加强超精密基础元部件的研发和生产能力建设,建立模块化设计及生产的标准,在国内形成超精密基础元部件专业配套生产厂家,为

超精密加工设备的产业化生产提供支撑。

(2) 注重超精密加工设备的设计、建立制造及检验标准,提高工程化水平。

除了关注超精密加工设备关键技术的攻关,也应重视设备的可使用性设计,例如超精密车床的金刚石刀具对刀系统、在线平衡系统,确定性研抛设备的工件误差在位测量系统等,这些部件除了有利于设备精度的提高,更多的是提高超精密加工设备的效率及增加操作的便利性。此外在设备的外观造型设计及设备噪音控制等人性化设计方面更应符合满足操作者的舒适性需求。

在目前技术水平下,超精密加工设备尚存在制造误差、驱动误差、联动误差、伺服匹配误差、受热变形、受力变形、非对称刚度、数控精度等误差来源,使零件加工轮廓不能完全与设计轮廓重合,表面粗糙度也体现各类频率误差的存在。随着超精密机床轴系的增多和精度的提高,一方面需要新的设备精度测量表征方法和检测检验手段;另一方面也可以逆向进行超精密加工设备的精度表征。为此,必须有一整套超精密设备制造技术规范与检验检测标准等,这样才能正确评价超精密加工设备的精度,实现对超精密加工设备的各类需求。

此外,建立超精密机床制造行业标准也是实现产业化推广的一个重要因素<sup>[7]</sup>,这些标准包括超精密部件静态及动态检测、部件间位置关系的检测与调整、超精密机床总体验收标准等。

(3) 将超精密加工工艺与设备相结合,为用户提供一体化的解决方案。

国外超精密加工设备解禁以后,国内高校、民企和相关国防领域各工业部门陆续引进了大量的各类超精密加工设备,但是真正能充分发挥设

备性能、应用效果良好的单位很少,主要原因是设备可以从国外引进,而用户需求的相关工艺却无法引进。国内生产厂家则可以通过为用户提供超精密加工设备与工艺一体化的解决方案,提高国产超精密加工设备的市场竞争力。

对于超精密研磨抛光设备这点尤为重要,由于此类设备是通过可控的去除函数保证零件的加工精度,因此设备研发厂家可以将设备工艺参数、不同工具及磨料、不同材料及不同形状零件的去除函数等超精密加工工艺参数以专家系统或数据库的形式集成到设备中供用户选择使用,同时跟踪用户对设备的使用效果,对设备的硬件及软件不断改进和升级,从而提升国产超精密研抛设备的水平。

(4)以国家重大项目需求为牵引,优先发展专用超精密加工设备。

专用超精密加工设备结构功能相对简单,从国外定制价格及周期用户可能无法承受,这也是国产设备实现产业化的一条捷径。例如我国激光核聚变点火工程(神光 III 工程)48 路激光所需的二千多块 KDP 晶体材料采用单点金刚石飞切加工,其专用设备全部由国内研制<sup>[8]</sup>,性能指标达到了国际先进水平,并形成了很好的批量化生产能力,保证了国家重点任务的需求。

从“十一五”开始国家根据产业和技术的发展需求,设立了包括“高档数控机床与基础制造装备重大专项”在内的 16 个国家科技重大专项,这也为高档功能部件和超精密加工设备整机的研制和发展提供了契机,相关成果已应用于航空航天领域复杂零部件的加工。此外“高分辨率对地观测系统”、“极大规模集成电路制造装备与成套工艺”等重大专项的启动对大口径及超高精度光学元件的产业化提出了需求,国内相关单位研制成功了磁流变抛光设备、离子

束抛光设备等,从而为专项的实施提供了有力技术保障和装备支撑,提升了我国先进装备制造水平。即将启动的发动机专项也将为轴承、叶片、喷嘴等发动机关键元部件的国产精密超精密专用加工和检测设备的研制和产业化提供有力的保障。

(5)联合国内从事超精密加工技术研究的单位、优势互补,组建超精密加工设备研发及产业化生产基地。

目前,国内从事超精密加工技术研究的单位众多,其中包括高校、中科院和各个军工集团研究所以及应用单位等,但大部分单位均各自为战,研究内容雷同、条件建设重复,从宏观战略层面缺乏统一的规划,有时甚至存在恶性竞争,而且主要目标都是为了解决行业内的任务或型号难题。国内目前虽然也设立了国家超精密机床工程技术研究中心(科技部)、国防超精密机械加工技术研究应用中心(国防科工局)等机构,但成员单位覆盖面有限,且管理松散,从体制和机制上很难真正做到各成员单位优势联合。

联合国内技术优势单位,打破行业壁垒,建立超精密加工设备研发和产业化实体,同时可考虑吸收民间资本,实现超精密加工设备的产业化,满足国内各行业的需求。

## 结论

超精密加工机床的特点是超高精度、高刚度、高稳定性、高自动化等,与普通精密机床相比其应用范围较窄,但主要是面向国家重点任务和型号的尖端科技领域,同时超精密加工技术也是体现一个国家制造技术水平的重要标志,是实现从制造大国向制造强国转变的基础技术。为此必须充分重视超精密加工技术的研究,建立我国超精密加工设备研发与产业化基地,形成产业化能力和商品化系列。

## 参考文献

- [1] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等.超精密加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(15):161-177.  
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [2] PARK C, SONG C, HWANG J, et al. Development of an ultra precision machine tool for micromachining on large surfaces[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(4):85-91.
- [3] 杨辉,张彬,张利鹏.微结构功能表面的应用及制造[J].航空精密制造技术,2015,51(5):1-6.  
YANG Hui, ZHANG Bin, ZHANG Lipeng. Application and manufacture of microstructure function surface. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(5):1-6.
- [4] 李圣怡.超精密加工技术与机床的新进展[J].航空精密制造技术,2009(2):26-28.  
LI Shengyi. New development of ultra-precision machine tool[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009(2):26-28.
- [5] 杨辉.高效、极致——精密超精密加工技术的发展与展望[J].航空制造技术,2014(11):26-31.  
YANG Hui. High efficient, Perfection-development trend of ultra-precision machining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11):26-31.
- [6] LIANG Y C, CHEN W Q, BAI Q S, et al. Design and dynamic optimization of an ultra precision diamond flycutting machine tool for large KDP crystal machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4): 237-244.
- [7] 孙涛.“中国制造 2025”背景下我国超精密加工机床技术的发展[J].制造技术与机床,2015(8):22-24.  
SUN Tao. Development of ultra-precision machining tool technology at the background of “Made in China 2025” [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2015(8):22-24.
- [8] 梁迎春,陈国达,孙雅洲,等.超精密机床研究现状与展望[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(5):28-39.  
LIANG Yingchun, CHEN Guoda, SUN Yazhou, et al. Research status and outlook of ultra-precision machine tool. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(5):28-39.

(下转第 46 页)