

超精密加工设备的发展与展望

Development and Prospect of Ultra-precision Machining Equipment

北京航空精密机械研究所 杨 辉



杨 辉

毕业于哈尔滨工业大学, 研究员、博士, 一直致力于超精密加工机理、超精密加工工艺、超精密加工设备基础元部件及其集成技术的研究, 在国内外学术期刊及会议上发表论文四十多篇, 获得多项国防科技成果奖以及航空集团公司科技成果奖。

超精密加工设备的发展历史

纵观国内外 40 多年超精密机床发展史, 可以总结出两大特点: 一是大学和研究所保持着对超精密机床研究的持续热情, 对高技术进行超前研究, 对超精密机床产业化和商品化起着推动的作用; 二是超精密机床的模块化、系统化是其进入市场的重要技术手段。

美国是开展超精密加工技术研究最早的国家, 也是迄今处于世界领先地位的国家。早在 20 世纪 50 年

当今超精密机床技术的发展趋势是: 技术上不断朝着加工的极限方向发展, 向更高精度、更高效率方向发展, 向大型化、微型化方向发展; 功能上向加工检测补偿一体化方向发展; 结构上向多功能模块化方向发展; 功能部件上向新原理、新方法、新材料应用方面发展, 总体来讲是向极限制造技术方面发展。

代末, 由于航天等尖端技术发展的需要, 美国首先发展了金刚石刀具的超精密切削技术, 称为 SPDT (Single Point Diamond Turning) 技术, 并发展了相应的空气轴承主轴的超精密机床, 用于加工激光核聚变反射镜、战术导弹及载人飞船用球面非球面大型零件等。

美国 Union Carbide 公司于 1972 年研制成功了 $R-\theta$ 方式的非球面创成加工机床。这是一台具有位置反馈功能的双坐标数控车床, 可实时改变刀座导轨的转角 θ 和半径 R , 实现非球面的镜面加工。Moore 公司于 1980 年首先开发出了用 3 个坐标控制的 M-18AG 非球面加工机床, 这种机床可加工直径为 356mm 的各种非球面金属反射镜。英国 Cranfield 大学精密工程研究所 (CUPE) 研制的大型超精密金刚石镜面切削机床, 可以加工大型 X 射线天体望远镜用的非球面反射镜 (最大直径可达 1400mm, 最大长度

为 600mm 的圆锥镜)。

20 世纪 80 年代, 美国 Union Carbide 公司、Moore 公司和美国空军兵器研究所制定了一个以形状精度为 $0.1\mu\text{m}$ 、直径为 800mm 的大型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, 这是一个里程碑式的研究计划。

20 世纪 80 年代中后期, 美国通过能源部“激光核聚变项目”和陆、海、空三军“先进制造技术开发计划”, 对超精密金刚石切削机床的开发研究, 投入了巨额资金和大量人力, 实现了大型零件的超精密加工。如美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 1984 年研制出一台大型光学金刚石车床 (Large Optics Diamond Turning Machine, LODTM), 至今仍代表了超精密加工设备的最高水平, 该机床可加工直径为 2.1m, 重为 4.5t 的工件。采用高压液体静压导

轨,在 $1.07\text{m}\times 1.12\text{m}$ 范围内直线度误差小于 $0.025\mu\text{m}$ (在每个溜板上装有标准平尺,通过测量和修正来达到),位移误差不超过 $0.013\mu\text{m}$ (用氦屏蔽的激光干涉仪来测量和反馈控制达到),主轴溜板运动偏摆小于 $0.057''$ (通过两路激光干涉仪测量,压电陶瓷修正来实现)。激光测量系统有单独的花岗岩支架系统,不与机床联结。油喷淋冷却系统可将油温控制在 $(20\pm 0.0025)^\circ\text{C}$ 。采用摩擦驱动,运动分辨率达 $0.005\mu\text{m}$ 。最终可实现加工大型光学零件直径达 1.4m ,面形精度为 $0.025\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a\leq 5\text{nm}$ 。

由于有了模块化和构件化的技术,研制新的超精密制造设备的费用和周期大大下降,技术难度也同时下降。进入80年代后,随着民用光学应用范围的扩大,超精密加工技术在民用行业得到了应用。英国 Rank Pneumo 公司于1980年向市场推出了利用激光反馈控制的两轴联动加工机床MSG-325,我国中科院长春光机所引进的我国第一台超精密加工设备即为该型号。随后又推出了ASG2500、ASG2500T、Nanoform300等机床。

经过多次的合并与收购,目前国际上主要生产金刚石超精密加工设备的厂商主要有:美国 Moore 公司、AMETEK 集团旗下的 Precitech 公司、Taylor Hobson 公司,这几家公司占据了绝大部分的市场份额。日本开发的超精密加工机床主要用于加工民用产品所需的透镜和反射镜,目前日本制造的加工机床有:东芝机械研制的 ULG-100A(H)、不二越公司的 ASP-L15、丰田工机的 AHN10、AHN30 \times 25、AHN60-3D 非球面加工机床等。

当今超精密机床技术的发展趋势是:技术上不断朝着加工的极限方向发展,向更高精度、更高效率方向发展,向大型化、微型化方向发展;

功能上向加工检测补偿一体化方向发展;结构上向多功能模块化方向发展;功能部件上向新原理、新方法、新材料应用方面发展,总体来讲是向极限制造技术方面发展。

超精密机床技术目前已经发展成为一项综合性的系统工程,其发展综合利用了基础理论(包括切削机理、悬浮理论等)、关键单元部件技术、相关功能元件技术、刀具技术、计量与测试分析技术、误差处理技术、切削工艺技术、运动控制技术可重构技术和环境技术等。因此,技术高度集成已成为超精密机床的主要特点。

新理论、新原理、新观点、新方法及新技术在超精密机床中的应用

近年来,超精密基础元部件及机床结构等方面应用了一些新理论、新原理、新观点、新方法和新技术。

1 在机床结构方面

为了增加超精密机床的静刚度和动刚度,一些超精密机床采用很特殊的结构,例如三角棱形立式结构的超精密磨床是为了超大直径($\phi 400\text{mm}$)硅片研磨加工设计的,改变了传统的龙门式结构在重的加工负载下容易产生俯仰和偏摆变形的

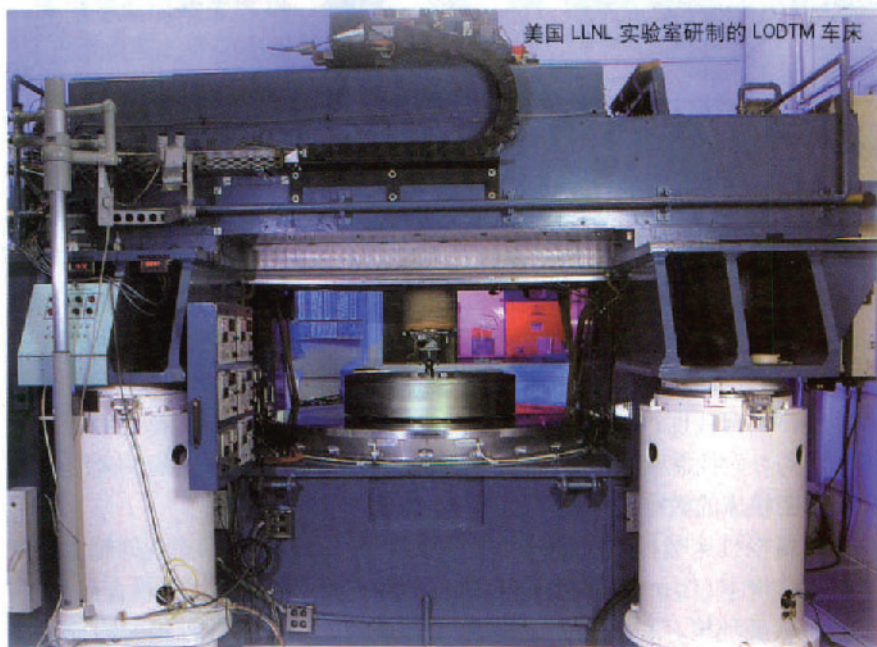
缺点。近年来采用多自由度并联机床结构,进一步增大了机床的刚度。

2 超精密主轴和导轨

在传统空气静压和液体静压轴承的基础上,通过控制节流量反馈方法来实现运动的主动控制从而提高轴承的刚度。磁悬浮主轴技术,永磁、电磁和气浮结合的控制方案也一直在研究中。多孔材料的气浮轴承可以提高气浮轴承的刚度。液体静压轴承具有刚度高、动态特性好等特点,但发热是其致命的弱点,水静压轴承的研制正是针对这一问题进行的。与油静压轴承相比,这种轴承的优点是轴承发热较小,适合于高速运转,而且没有污染,特别适合硅片加工等行业。

3 超精密驱动技术

精密滚珠丝杠是超精密机床驱动采用的常规方式,但是这种方式存在许多缺点,限制了运动精度的进一步提高。为此,气浮丝杠和液体静压丝杠在一些日本研制的超精密机床上得到了应用,但是采用这种传动方式的零件加工工艺极其复杂,限制了其应用。摩擦驱动具有运动平稳、无反向间隙等特点,在一些轻载、低速的超精密加工设备及检测设备上得到了应用。近年来,直线电机在超精



2008年第24期·航空制造技术 43

密加工设备的驱动上得到了广泛的应用,也成为一种趋势。直线电机采用无机械减速系统的无摩擦直接驱动方式,适合高精度、高分辨率、高速等场合。

4 超精密加工的误差建模与补偿技术

用变分法精度、多体动力学等分析误差建模理论,可以将刀具几何参数、加工工艺条件及机床运动误差三大因素对加工工件的精度影响准确的建立数学模型。近年来一些数学工具如微分几何、李代数和李群在复杂几何形状误差的评定和分析方面得到了一些应用,并有望在超精密机床误差分析中得到运用。在机床运动精度和工件形状精度处于同一数量级时,多传感器误差分离方法是分离误差最有效的方法之一。例如,对主轴运动误差和工件圆度误差的分离,溜板运动误差与工件直线度的分

条件下满足高质量切削条件,意味着需要高的控制速度,例如插补周期小于1ms(普通数控为10ms左右),伺服闭环采样周期小于0.1ms。

PC机的发展给数控技术带来新的变化,基于PC的数控系统已成为超精密数控系统的趋势。例如美国的NANOPATH和PRECITECH'S ULTRAPATH TM都是基于DSP的超精密数控系统。数据系统的硬件运动控制模块(PMAC)开发及运用越来越广泛,使基于PC的数控系统的可靠性和可重构性得到提高。新的芯片(如SERCOS)和网络协议的发展又给数控系统提供了一种分布网络式的新结构,使其可靠性和开放性更好。

超精密数控机床不难实现高定位精度,即使在超精密概念下有一些非线性环节,采用适当的控制算法都可以得到很高的定位精度。但是

当机床作非直线运动时(多轴联动)对指定轮廓曲线的控制精度(跟踪精度)还取决于机床各维运动的动态特性。因此,很难保证高的跟踪精度。一些适当的控制技术(如解耦控制技术)可以将多维运动参数加以解耦来提高跟踪精度。

多轴联动数控系统的精度主要从单个伺服轴的运动控制精度和联动轴耦合轮廓精度2方面来评价。对于单个伺服轴的运动控制,当要求的运动精度达到纳米级时,传统的超精密机床传动方式在低速、微动状态下表现出强非线性特性,常规的运动控制策略已经很难保证伺服系统实现理想的纳米级随动精度。

此外,多轴联动系统的轮廓误差由各伺服轴的运动误差耦合得到,耦合误差的建模及各轴相应的补偿控

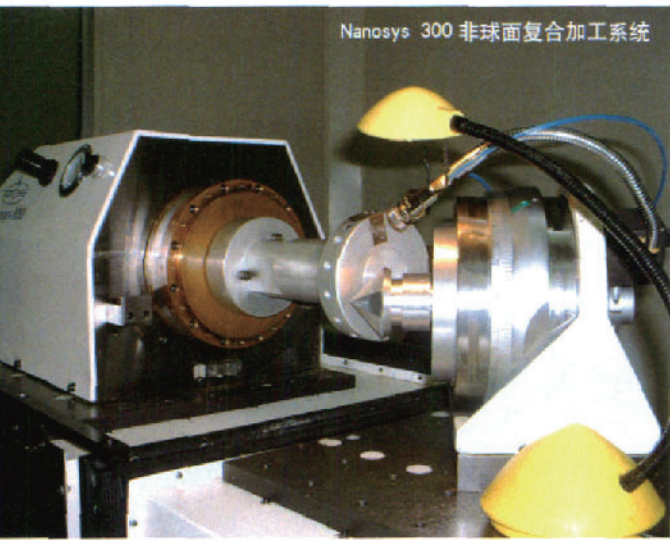
制量的计算都需要大量的齐次坐标变换运算,这为实际的多轴联动耦合控制器的设计带来了很大的不便。智能控制理论与方法将可能为此问题提供理想的解决方法。此外,要实现多轴联动纳米级轮廓控制精度,还有一个不可忽视的问题,即联动轴的同步问题。同步精度的高低直接影响到系统的轮廓跟踪精度。严格意义上的多轴伺服系统同步涉及到复杂的数控和伺服系统接口规范的制定。目前,在可以实现亚微米级加工的高档多轴联动超精密数控机床研制方面,我国尚未取得突破性进展。至于可实现大型复杂曲面,特别是自由曲面的纳米级超精密加工的五轴联动机床,至今仍是一个世界上尚未解决的难题。

我国超精密加工设备与国际先进水平的差距

超精密加工设备的研制目前在国内还处于起步阶段,还没有形成一个产业,在超精密加工设备以及超精密加工工艺技术等方面,国内各个单位各有特点,相互之间进行深层次交流还存在着一定的障碍。

一直以来西方国家对我国超精密加工设备处于禁运状态,正是在这种情况下国内各行业才开始进行超精密加工设备的研制,例如非球面超精密加工设备在20世纪80年代甚至90年代初期仍属于禁运产品,但随着国内多家单位(如北京航空精密机械研究所、哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京机床所等)相继研制成功非球面超精密加工设备,虽然在性能指标以及可靠性等方面还有很大差距,而且并没有形成商品。但多家国外公司纷纷解除了禁运,而且价格大幅度下降,从当初的1000多万人民币已经降到目前的300多万,这表明超精密加工设备的研产生了巨大的经济效益和社会效益。

北京航空精密机械研究所研制



离等。圆度三点法技术已相当成熟,在直线度测量中,多传感器安装误差和测量加密算法已得到很好解决,因此,圆度和直线度误差分离技术可顺利地推广到圆柱度、平面度超精密误差测量与补偿控制领域。

5 超精密机床的数控系统

超精密机床数控系统的特点是编程分辨率(1nm)和高精度的伺服控制软硬环境。在高编程分辨率

的 Nanosys-300 非球面曲面超精密复合加工系统具有 CNC 车削、磨削、飞切(铣削)等多种加工功能,可对球面、非球面和超平面等形状零件进行纳米级超精密镜面加工。系统采用以工控 PC 为平台、多轴运动控制器为核心的高性能开放式数控系统,主要包括纳米级坐标测量与伺服控制系统,超精密、高速空气静压主轴系统,超精密、高刚性、高阻尼闭式液体静压导轨系统,超精密、高速、高刚性空气静压磨头系统,喷雾、吸屑系统,气浮减震调平系统,在位对刀和工件检测系统,以及 ELID 金刚石砂轮修整、延性磨削系统等单元。目前正在研制的 Nanosys450 已经进入了装配调试阶段,1m 口径的大型非球面超精密加工设备也进入了设计阶段。

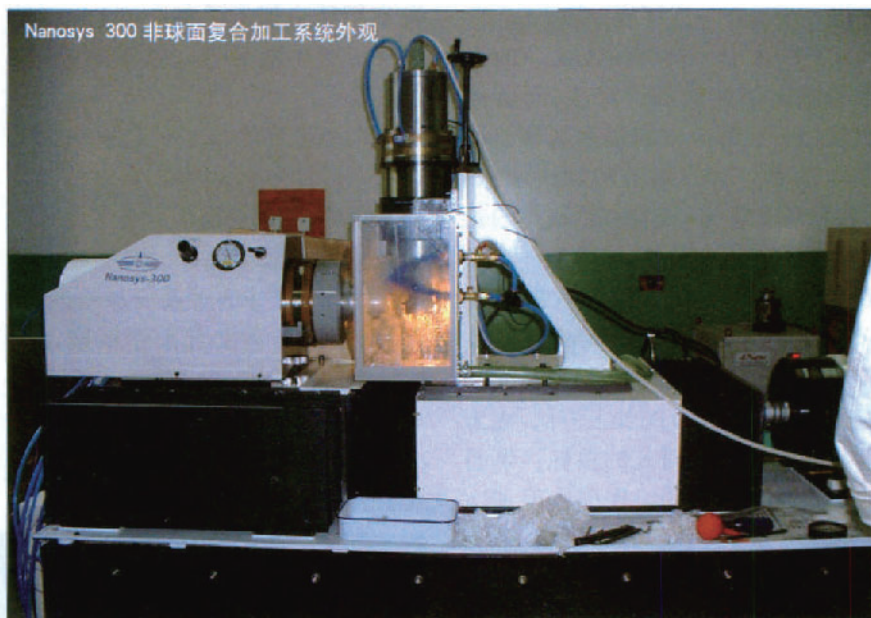
但是与欧美国家相比,我国在超精密加工设备的研制和生产等方面存在着较大的差距。研究力量分散,没有形成产品系列化和产业化的局面。单项技术指标尽管很高,但总体技术水平落后,不足以满足我国超精密加工行业的需要,大部分还只是停留在研究型机床的状态。

我国在此领域的基础研究水平虽有很大提高,但在性能完备性、可靠性、与精度保持性上还有较大的差距。由于超精密机床设备技术含量高,种类多,批量小,关键部件缺乏国内配套产品支持等原因,国内超精密专用加工与检测设备与国外相比有更大的差距,阻碍了我国高新技术的发展和国防现代化发展的步伐,具体表现在以下几个方面:

(1) 设备的总体性能。对于一些复杂形状的零件加工,需要两轴以上的超精密加工设备才能完成,例如 Precitech 公司和 Moore 公司已商品化生产五轴超精密切削加工设备,而国内的金金刚石切削设备目前只做到了两轴。

(2) 综合精度指标及稳定性。

国内研制的超精密切削加工设备无论是主轴还是导轨的单项技术指标与国外商品相比已经接近,但是从设备的总体技术指标来看还有一定的差距。国内加工机床的面型精度虽然也可以达到亚微米级,但是对加工



条件要求苛刻,更重要的是不能稳定地达到亚微米级的面型精度。

(3) 控制系统方面。Moore 公司自行开发的 Delta Tau 运动控制系统、Precitech 公司自行开发的 UPx™ Control System 等,都已经各自公司生产的设备上得到了很好的应用。国内研制的超精密加工设备中的控制系统有的是自行开发的,也有的是直接引进的通用型数控系统,无论是控制系统的性能还是软件等方面都存在着较大的差距。

(4) 超精密加工设备的可靠性。国外加工设备的商品化已经 20 多年,产品的成熟度和可靠性非常高,都已经经历了时间和市场的考验。而国内目前大多数研究单位只是进行了一轮样机的研制,还有很多基础技术不成熟,设备可靠性差。

(5) 外观造型设计及人性化设计。国产设备在外观造型设计及人性化设计方面与国外产品存在较大差距。

(6) 机床附属功能。国外超精密加工设备上都有一些附属但同时又是必须的附件和功能,可以使操作者能够非常轻易地实现零件的加工,如刀具测量与调整系统、工件误差在位测量系统等。而国内研制的这些

超精密加工设备大多只能依靠操作者的经验和技能实现基本的加工功能。

(7) 基础元部件。国外超精密基础元部件都有专业的生产厂商,如 Loadpoint 专业生产超精密主轴、超精密导轨等,已经形成系列化、标准化。而驱动电机、编码器、光栅等元部件的生产国内还无法解决,只能依赖于进口,但又受到种种限制。

(8) 机床的集成技术。从高精度零件的加工,主轴导轨等部件的装配,到整台设备的装配及系统调试,都存在着较大的差距。

超精密加工设备的展望

1 高精度、高效率

高精度与高效率是超精密加工永恒的主题。首先通过提高机床转速和刀具进给速度来缩短加工时间。以往商用超精密机床主轴转速为 3000r/min,现已有 15000r/min 的机床出售。采用直线电机可大大提

高进给回程速度,芯片封装设备的运动加速度可达 $10g$ 以上。其次是通过提高运动部件刚度来提高精度和效率,如高刚度空气轴承(多孔质取代小孔节流)、液体静压轴系(液压油和纯水轴承)等,还可采用补偿软件进一步提高加工精度。

总的来说,固着磨粒加工不断追求着游离磨粒的加工精度,而游离磨粒加工不断追求的是固着磨粒加工的效率。当前超精密加工技术(如CMP、EEM等)虽能获得极高的表面质量和表面完整性,但以牺牲加工效率为保证。超精密切削、磨削技术虽然加工效率高,但无法获得如CMP、EEM一样的加工精度。探索能兼顾效率与精度的加工方法,成为超精密加工领域研究的目标。半固着磨粒加工方法的出现即体现了这一趋势。另外,电解磁力研磨、磁流变磨料流加工等复合加工方法的诞生也是趋势表面。

2 加工及检测一体化

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室研制的LODTM为达到几十纳米形状精度,除环境控制十分严格外,加工设备同时也是在线检测设备。此外,加工与检测一体化还体现在日本佳能公司的超光滑抛光机(CSSP)以及英国克林菲尔德大学的精密工程研究所研制的OAGM-2500大型磨床上。目前Precitech公司、Moore公司生产的商品化超精密加工设备上配备了在线检测系统。

3 工艺整合化

当今企业间的竞争趋于白热化,高生产效率越来越成为企业赖以生存的条件之一。在这样的背景下,出现了“以磨代研”甚至“以磨代抛”的呼声。另一方面,使用一台设备完成多种加工(如车削、钻削、铣削、磨削、光整等)的趋势越来越明显。

4 大型零件和微小结构的超精密加工

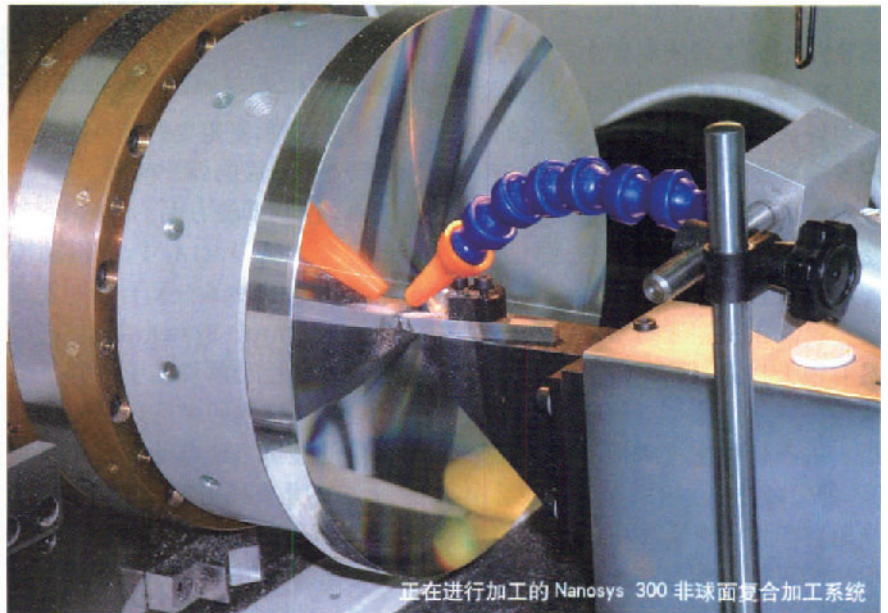
加工航空、航天、宇航等领域需要的大型光电子器件(如大型天体望远镜上的反射镜),需要大型超精密加工设备。加工微型电子机械、光电信息等领域需要的微型器件(如微型传感器、微型驱动元件等),需要微型超精密加工设备(但这并不是说加工微小型工件一定需要微小型加工设备)。

大型零件的精密/超精密加工较之一般零件更为困难,特别是大型光学零件,不仅是因为这类零件对成形精度的要求很高(一般达 $\lambda/几十$),而且还要求表面及表层无损伤。例如,美国亚利桑那大学斯迪瓦天文台大镜实验室10m口径的KECK望远镜,法国REOSC直径8.4m天文望远系统反射镜。激光核聚变、激光武器和空间像机等需要应用大量

透镜,尺寸在 $200\mu m$,微驱动器中的轴系等,这些零件不仅是三维立体结构,因为运动还要求很高的精度和镜面的表面,特别是这些微小零件壁厚在几十微米至几微米,加工后表面机械物理性能的改变,常常使整个零件或系统出现故障,造成严重事故。

5 超精密加工技术向更高精度的层次发展

超精密加工技术正受到毫微米精度的挑战,还面临微机械加工的要求,传统的加工也面临不适应的局面。因此从战略上必须重视这些发展。例如在微机械的制造技术领域,微机械与微机械加工已是当前超精密加工技术延伸的一个重要方面。它与传统的机械加工有着很大差异,并逐渐成为超精密加工技术领域的一种崭新的动向,起到了推动超精密



正在进行加工的Nanosys 300非球面复合加工系统

大型光学零件。近20年来出现了多种高精、高效加工方法以及对对应装备。微小零件是指尺寸在几十微米至几毫米的零件,由于尺寸小,刚度差,给超精密加工带来很大困难。为减少对人力资源的消耗和对环境的污染,产品微型化、集成化是一必然趋势。目前不少微电子、光电子产品、宇航器等军用产品中的微小零件愈来愈多。例如,光纤通讯中所用光学

加工技术发展的作用。LIGA技术就是这种趋势典型的产物,电加工向微细加工的发展也是重要表现。由STM、AFM等组成的SPM系统已经应用到机械加工领域,超精密加工的表面质量通过这类测量仪表的计量,使加工的技术水平向更高层次发展。这些技术的发展不仅推动了微机械技术的发展,而且也促进了传统机械加工的进步。(责编 未艾)