

DOI : 10.3901/JME.2013.19.171

# 大口径光学元件超精密加工技术与应用\*

郭隐彪 杨 炜 王振忠 彭云峰 毕 果 杨 平  
(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

**摘要：**大口径光学元件超精密加工技术是多种学科新技术成果的综合应用，促进了民用和国防等尖端技术领域的发展，在国家大光学工程的推动下，我国的超精密加工技术取得显著的成果。围绕大口径光学元件“高精度磨削+确定性抛光”超精密加工体系，介绍该领域研究进展及厦门大学微米加工与检测联合实验室取得的相关研究成果，主要针对光学元件磨削和抛光两个加工流程，详细分析磨削装备技术、磨削工艺技术、精密检测技术、可控气囊抛光技术、加工环境监控技术和中频误差评价技术等关键技术的研究应用情况。这些技术研究从超精密加工的需求出发，借鉴国内外的研究经验和成果，通过对装备、工艺、检测等各方面整合，形成具有自主知识产权的大口径光学元件磨抛超精密加工体系，从而实现大口径光学元件高精度、低缺陷加工。

**关键词：**超精密加工 磨削加工装备 磨削加工工艺 精密检测 气囊抛光 环境监控 中频误差评价  
**中图分类号：** TG58

## Technology and Application of Ultra-precision Machining for Large Size Optic

GUO Yinbiao YANG Wei WANG Zhenzhong PENG Yunfeng BI Guo YANG Ping  
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract :** The ultra-precision machining technology of large size optic is a comprehensive application of various sciences, which promotes the development for civil and national defense use. Under the processing of national optical project, our country makes great progress in this field. The development of ultra-precision machining technology for large size optic in micro/nano machining and measuring laboratory of Xiamen University is introduced, particularly in grinding equipment, grinding process, precise measuring, controlled bonnet polishing, environment monitoring, mid-spatial frequency error assessing and et al. From the requirement of the ultra-precision machining, the laboratory uses the experience of other countries for reference and integrates the above technology, then forms an intellectual property of grinding and polishing system independently for large size optic manufacture.

**Key words :** Ultra-precision machining Grinding equipment Grinding process Precise measuring Bonnet polishing Environment monitoring Mid-spatial frequency error assessing

### 0 前言

超精密加工是为适应现代高新科技发展要求而发展起来的一门学科，研究的重点和难点是先进光学制造技术，尤其是大口径非球面元件的超精密光学冷加工。在现有粗磨、精磨及抛光工艺制造流程线上，高精度批量化加工需求迫切要求提升现有

大口径光学元件超精密磨削、快速抛光与检测装备及相关技术水平。

目前已开发的金刚石砂轮超精密磨削、数控小磨头抛光、机器人抛光、磁流变抛光、离子束抛光等加工技术已基本解决了光学元件的不同阶段加工问题。存在的问题是国际上相应加工设备的制造技术水平及总体成套水平高，国内起步较晚，大部分处于探索研究阶段；从提高加工效率上来讲，已有的加工技术并未形成良好的加工体系，设备与工艺的衔接集成度差。欧美部分国家在大口径非球面光学元件加工技术的开发计划中，提出了多功能、复

\* 国家自然科学基金(51075343, 51275433)和国家科技重大专项(2011ZX04004-061, 2013ZX04001000-206)资助项目。20130402 收到初稿，20130820 收到修改稿

合大型超精密多轴机床和技术研究, 最终目的是直接从毛坯加工出能达到精度和效率要求的光学镜面。

在现阶段国内制造水平制约下, 将超精密磨削引入大口径非球面制造流程中, 实现分阶段“高精度磨削+确定性抛光”技术, 已成为该领域研究切实可行的技术发展趋势。对于要实现大口径光学元件的超精密加工, 除了高精度磨削、抛光机床及检测装备之外, 还需要一系列的关键配套技术, 包括: 加工控制、检测方法及表面评价、加工工艺及辅助制造软件、超精密环境监控技术等。

本文以大口径光学元件超精密加工技术为主要研究内容, 阐述了现阶段大口径光学元件高精度、高效率、高自动化加工技术的研究发展情况, 涉及到加工机床、加工工艺、面形检测、加工环境监控、中频误差评价等关键技术。

## 1 光学元件磨削加工装备技术

大尺寸高精度磨削机床是大口径光学元件加工的基础。已用于实际大口径光学元件加工的代表产品: 英国 Granfield 大学的精密工程研究所开发的 OAGM2500 大型超精密机床, 用于磨削和坐标测量大型曲面反射镜, 最大加工尺寸为  $2\ 500\text{ mm}\times 2\ 500\text{ mm}\times 610\text{ mm}$ ,  $XY$  轴采用液体静压导轨,  $Z$  轴磨头和测头系统采用空气静压轴承, 运动轴分辨率为  $2.5\text{ nm}$ , 可实现加工精度为  $2.5\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $R_a$  可达  $5\sim 50\text{ nm}$ 。德国 Satisloh 公司开发了完整非球面加工机床系列, 包括非球面粗/精磨 GII 系列、抛光 AII 系列等。国防科学技术大学设计制造的大型非球面加工机床 AOCMT, 具有  $XYZAC$  5 轴数控联动功能, 加工件直径  $\leq 600\text{ mm}$ ,  $AC$  轴分度精度为  $1'$ , 对  $\phi 116\text{ mm}$  的 SiC 抛物面铣磨精度为  $8.9\text{ }\mu\text{m}$ , 经研抛加工后工件最终面形精度为  $0.029\text{ }\mu\text{m}$ 。北京东华精密机械有限公司生产的 DHM-500 超精密数控非球面磨床, 主轴及  $B$  轴回转精度为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,  $XZ$  轴分辨率为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ , 行程为  $280\text{ mm}\times 170\text{ mm}$ , 可实现加工件的精度为  $\pm 5\text{ }\mu\text{m}/\text{直径 } 500\text{ mm}$ 。

通过分析大口径非球面方程类型可以发现, 开发三轴联动加工的大型精密、超精密平面磨床可满足轴对称和非轴对称非球面加工基本要求。近年来, 随着机床技术和数控技术的发展, 平面磨床不在局限于平面磨削, 已延伸到空间表面成形磨削加工。三轴联动的超精密平面磨削机床在大口径先进光学元件非球面、自由曲面的加工中应用越来越广泛。目前, 垂直、横向最小进给量  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  的大型

超精密平面磨床在国际上已相当普遍, 在超精密磨削加工领域, 具有代表性的如日本 Nagase(长濑工机)公司的 N2C-C、N2C-U 及 SGC 系列, Okamoto(冈本)公司的 UPG 及 PSG 系列, 瑞士 Magerle(美盖勒)的 MFP 系列。平面磨削机床的结构特点决定了它是磨床类机床中发展潜力最大的机床。

对于平面磨床, 其卧轴矩台布局由于具有精度高和通用性好等特点在精密和超精密平面磨床中得到广泛应用, 在其结构型式上立柱移动式相比磨头移动式、拖板移动式两种具有结构简单、总体刚性好、磨削效率高等特点, 且左右和前后的独立运动, 可进一步减少复合误差。从我国大口径光学元件超精密加工需求出发, 本课题组研制了高精度卧轴矩台平面磨床 2MK1760, 如图 1 和图 2 所示。磨床采用立柱移动式数控卧轴矩台磨床结构, 数控系统采用 FANUC 31i 系列, 砂轮修整器采用 GC 杯形砂轮修整器<sup>[1]</sup>。机床加工范围为  $800\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ , 各轴分辨率为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ , 主轴最高转速为  $3\ 000\text{ r/min}$ ,  $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$  非球面元件加工面形波峰波谷(Peak valley, PV)值优于  $5\text{ }\mu\text{m}$ 。



图 1 精密磨削机床 2MK1760



图 2 磨削机床辅助配套系统

## 2 光学元件磨削加工工艺技术

开发加工设备、研究加工原理和改善加工精度方法等的目的就是要应用于实际加工中。目前非球面的加工大多采用超精密数控机床, 用于提高加工

精度和效率。数控技术的核心是由计算机(主要是软件)实现对加工过程中的信息进行处理和控制,实现加工过程自动化。要满足当前对大口径光学元件日益增长的需求,关键是实现以高精度加工设备配套高自动化程度的计算机辅助制造软件为核心的高效磨削技术。本课题组率先在国内开展了大口径非球面加工设备与加工工艺集成衔接的计算机辅助制造软件系统开发及实际应用研究。

为保证磨削的加工精度及充分发挥数控磨床精度特性,根据不同类型工件和具体磨床结构方式,需要选择合理有效的加工工艺和加工规划,优化磨削加工参数以提高面形精度和减小磨削亚表面损伤<sup>[2-4]</sup>,图3所示为本课题组所采用的磨削工艺流程图。其中加工补偿控制方法是关键,即在机械系统的特性达到极限,其性能不能进一步改善时,可以通过依靠其加工工艺的优化,从加工控制方面进行提高。良好的加工工艺优化可提供恒定的加工精度、高加工能力和高经济效益。为此,本课题组以提高加工精度为目的,提出了一系列工艺优化方案:建立基于误差参数精度建模的补偿技术;深入分析砂轮磨损的实质,提出了砂轮均匀磨损与速度控制技术,有效提高砂轮寿命;针对非球面加工中的圆弧半径误差,分离其误差成分并进行补偿加工以提高加工精度;为提高砂轮修整效率,提出砂轮修整参数优化技术。

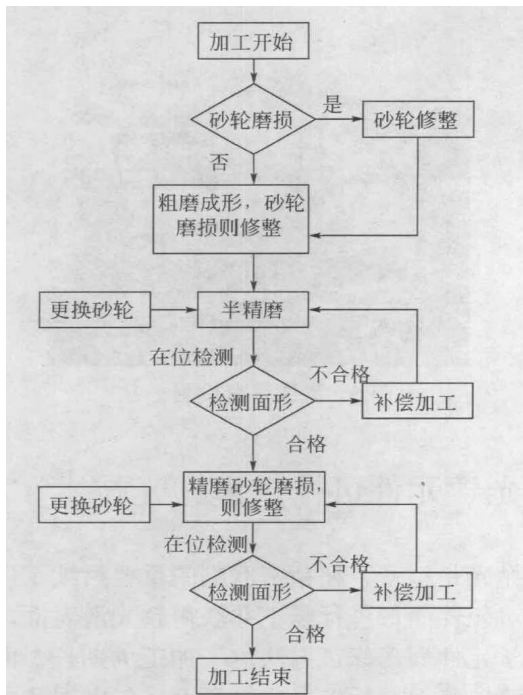


图3 磨削工艺流程图

基于上述的工艺优化方案,合理地制定加工工艺,配合计算机技术,特别是利用计算机辅助制造

和测量,是实现加工过程信息自动处理及控制,实现加工过程自动化和提高加工效率的关键。为此本课题组开发用于实现超精密磨削的计算机辅助制造系统软件,其功能包括磨削加工、面形测量、磨削补偿、面形拟合和环境监控等,辅助制造系统软件的应用可使整个磨削过程更加高效、便捷。

### 3 光学元件精密检测技术

大口径非球面检测一般有两方面内容,一是粗精加工阶段的在位测量,为补偿加工提供数据,该阶段特点是工件表面较粗糙,不能用干涉仪等进行检测;二是加工完成后工件加工质量的离线检测及评价。在位测量通常是在机床主轴上安装接触式或非接触式高精度传感器,利用机床的运动机构按规划好的测量路径进行。在测量中主要的误差是测量原点的偏移误差和测量坐标系与工件坐标系的偏角误差。当采用接触式测量时,由于测量触头半径的精度问题,也会引入一定的误差,需要进行误差补偿。数据处理流程为标度变化、剔除奇异项、平滑处理、测量误差补偿、曲线拟合等,最终生成可用于补偿加工的补偿加工数据。目前在位测量所采用的商品化传感器主要有日本 Keyence 公司的激光位移传感器、德国 Heidenhain 公司的接触式长度计、英国 Renishaw 公司的测头系统,国产中原量仪的电感测微仪等。

离线测量方法很多,接触式中最常用的就是三坐标测量机和轮廓仪,量程较大,但该类设备十分昂贵、维护和使用环境要求很高,尤其是测量精度  $1\ \mu\text{m}$  以下。已有商业化三坐标测量机空间精度  $0.6+L/600\ \mu\text{m}$ ,探测精度  $0.6\ \mu\text{m}$ 。轮廓仪方面以 Taylor Hobson 公司的 PGI1240 非球面测量系统最为出色,具有  $200.0\ \text{mm}\times 12.5\ \text{mm}$  的测量范围、 $0.8\ \text{nm}$  的传感器分辨率。在各种非接触式测量方法中,干涉法以其灵敏度高,加之补偿镜、计算全息、移相、外差、锁相、条纹扫描等先进技术的出现,一直成为非球面检测的主要途径。该领域世界知名企业,英国 Taylor Hobson、美国 Zygo 和 Veeco、日本三鹰光器等公司均有亚纳米级激光干涉系统产品,用于非球面的非接触式三维测量。

伴随着非球面加工技术的发展,近年来在原有的非球面零位检验基础上,相继出现了一些新的检测技术,可应用于高精度大口径非球面的离线测量,如计算全息检测技术(Computer-generate hologram, CGH)、子孔径拼接干涉法(Subaperture stitching interferometric, SSI)、数字莫尔条纹法(Digital moiré

interferometric, DMI)等。俄罗斯、美国、德国等国家开展了利用计算全息法检测大型非球面镜方面的工作。国内长春光机所研制出四轴激光直写写入设备,并开展了利用球面计算全息样板检测大口径非球面的研究。国防科学技术大学在大口径光学零件的子孔径测试领域进行了深入研究,致力于解决大口径、大相对口径非球面的全口径、全波段光学检测问题。长春光机所利用数字莫尔条纹结合数字相移技术开展了子区域拼接的大口径非球面检测。

在大口径光学元件制造过程中,从分阶段“高精度磨削+确定性抛光”加工技术体系来讲,大口径光学元件的加工一般经历铣磨,磨削,抛光三个阶段,每个加工阶段都需要匹配对应测量精度的检测技术。其中,磨削阶段作为衔接铣磨和抛光阶段的中间环节,该阶段面形精度的检测是决定元件加工精度能否有效收敛的关键因素,而此阶段需要达到数十微米到亚微米的面形误差检测。因此,该阶段的检测,即在位检测或离线坐标检测手段及方法的开发应用十分重要。

图 4 所示为本课题组针对高精度磨削机床开发的在位检测系统,在位测量可以避免工件离线测量引入装夹、定位等误差,实现对工件加工表面精度进行测量,并可为补偿加工提供加工误差数据。该在位检测系统测量数据处理方法中最重要的是误差补偿,主要包括误差分离、误差修正。补偿的主要步骤为首先找出影响误差的主要因素,确定误差项目;其次建立误差分离模型,并基于误差分离的结果进行有效修正。图 5 所示为利用在位检测系统检测大口径非球面光学元件初始加工和补偿加工后的面形精度图,经过三次补偿加工后面形精度 PV 值由  $7.77\ \mu\text{m}$  下降到  $4.67\ \mu\text{m}$ 。

图 6 所示为本课题组研制的三维轮廓测量离线精密检测平台,该检测平台采用固定桥式结构,XYZ 轴行程分别为  $400\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$ ,各轴定位精度为  $\pm 1\ \mu\text{m}$ ,整体设计测量精度目标为  $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。检测平台由计算机控制各轴的运动轨迹,并采用接触式和非接触式双探测系统,可针对不同工件需求实现工件面形数据的实时采集<sup>[5-6]</sup>,采集后的面形原始数据通过相关数据拟合算法和误差分析,可拟合出实际加工后的工件面形,将拟合后的工件面形与理想的非球面面形比较,从而求出非球面面形误差和各种像差等参数,为后续加工提供加工补偿数据。如图 7 所示为测量轴对称和非轴对称非球面的面形精度图。



图 4 在位检测系统

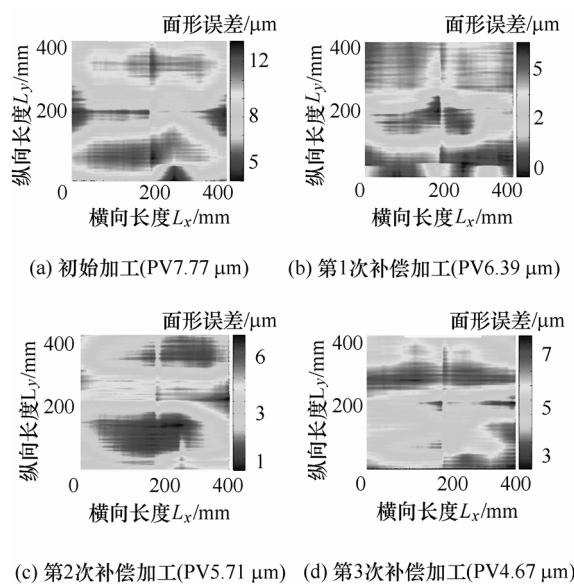


图 5 初始加工和补偿加工面形精度图

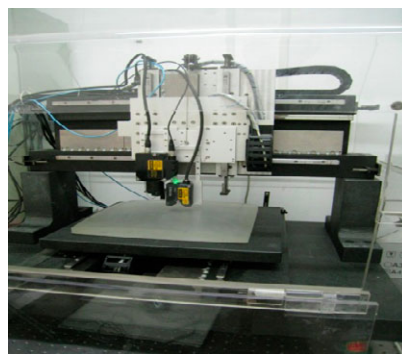
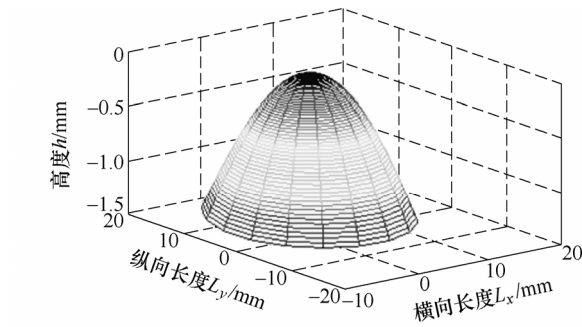


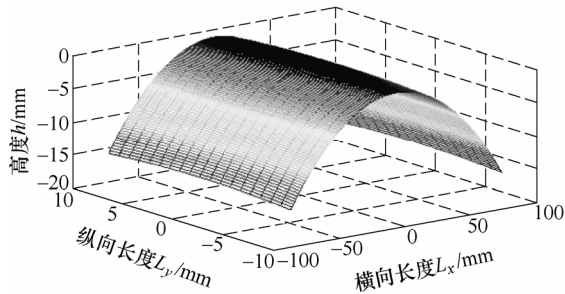
图 6 离线精密检测平台

## 4 光学元件可控气囊抛光技术

抛光是精密、超精密磨削的重要后续工序,主要是对元件面形进行修正并获得超光滑表面。传统的光学元件面形修正方法由于加工周期长、面形收敛慢等缺点很难适应现代光学系统的发展需求,故出现不少先进的现代抛光方法,例如小磨头数控研抛、应力盘抛光、离子束抛光、磁流变抛光和气囊抛光<sup>[7-10]</sup>等确定性抛光技术。小磨头数控研抛由于



(a) 轴对称非球面轮廓拟合图



(b) 非轴对称非球面轮廓拟合图

图 7 离线检测非球面轮廓拟合图

工具尺寸小,易产生中高频误差,若工具增大尺寸,盘面与工件表面不能很好吻合,导致加工精度低。应力盘抛光能克服这个问题,但是修形能力较弱,且控制复杂。二者都属于接触式加工方法,加工中由于盘面和元件的接触应力使元件发生弹性形变导致元件面形很难加工到较高的精度。离子束抛光技术属于非接触式抛光技术,虽能克服传统方法的缺点,但是其抛光效率极低,且对加工环境要求极高。磁流变抛光和气囊抛光技术属于柔性抛光技术,能够实现很高的加工精度,但磁流变抛光成本很高,且其很难应用于加工凹曲面以及大口径高陡度的工件。

气囊抛光技术是由英国 ZEEKO 公司和英国伦敦光学实验室<sup>[7-8]</sup>于 20 世纪 90 年代联合提出的抛光新技术,其采用具有一定充气压力的球冠形气囊作为抛光工具,不仅可以保证抛光头与被抛光工件表面吻合性好,而且可以通过调节气囊内部压力控制抛光效率和被抛光工件的表面质量,是一种极具发展潜力的抛光方法,尤其适用于非球面和自由曲面的抛光。同时,其采用一种独特的进动运动方式,即抛光过程中,气囊自转轴始终与工件局部法线呈固定角度(称进动角)进行抛光,可以在接触区形成杂乱的划痕,生成接近高斯分布的去除函数。

气囊抛光的加工控制对设备精度依赖程度低,是一种极具发展潜力的大口径光学元件抛光方法。已有的气囊抛光研究主要集中在对气囊抛光工艺试

验结果的报道,对于“高精度磨削+确定性抛光”的大口径光学元件加工技术发展趋势而言,提高气囊抛光技术在去除函数和加工控制上的可控性十分必要。因此应加强研究大口径光学元件气囊抛光去除函数基础理论,明确气囊抛光光学元件去除函数的稳定性影响因素,探索光学元件的高效加工技术理论;研究气囊抛光控制技术,开发精确进动运动控制模型及面形快速收敛算法等,确保材料去除函数的稳定性,从而实现高效、高精度与简化控制的确定性气囊抛光技术<sup>[9-10]</sup>。本课题组开发了可控气囊抛光试验样机并进行相应加工试验,图 8 为样机模型图和样机实物图。课题组主要是研究可控气囊抛光的加工机理,将试验与仿真相结合,确定不同工艺条件对抛光接触区的影响,以及不同条件下气囊抛光的静态和动态去除函数;研究基于去除函数实现抛光驻留时间算法;研究基于运动学理论的气囊抛光过程中进动控制方法,得出最高效的进动控制算法。

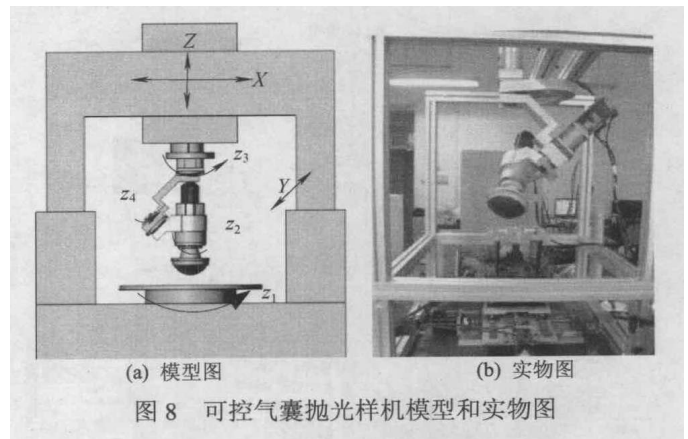


图 8 可控气囊抛光样机模型和实物图

## 5 光学元件加工环境监控技术

目前,由加工系统硬件提升光学元件精度和质量面临发展瓶颈,加工环境监控技术成为提高加工效率、实现高质量光学表面自动化批量生产的重要手段。

在光学元件自动化批量制造这一目标的驱使下,本课题组以精密与超精密磨削和抛光加工为研究对象,针对振动、温度、声发射、磨削力等动态过程量,开发了精密加工环境远程实时智能监控系统,其总体框架如图 9 所示。系统采用 DSP 技术实现多类型动态信号多通道同步采集,利用 ARM 处理器实现采集数据实时无丢失传输,系统通过 Wi-Fi 无线网络通信技术连接 Internet 网络,采用加工现场监测和远程中心两级监测机制,实现加工环境的实时监测和远程控制。监测系统软件由静态参数设

置、振动监测、温度、声发射监测子系统，以及后台支撑数据库系统构成<sup>[11]</sup>。系统针对不同类型动态信号开发相应的特征提取方法，通过优化筛选得到典型特征，实现加工状态的实时监测。如图 10 所示为精密加工环境远程监控软硬件系统。

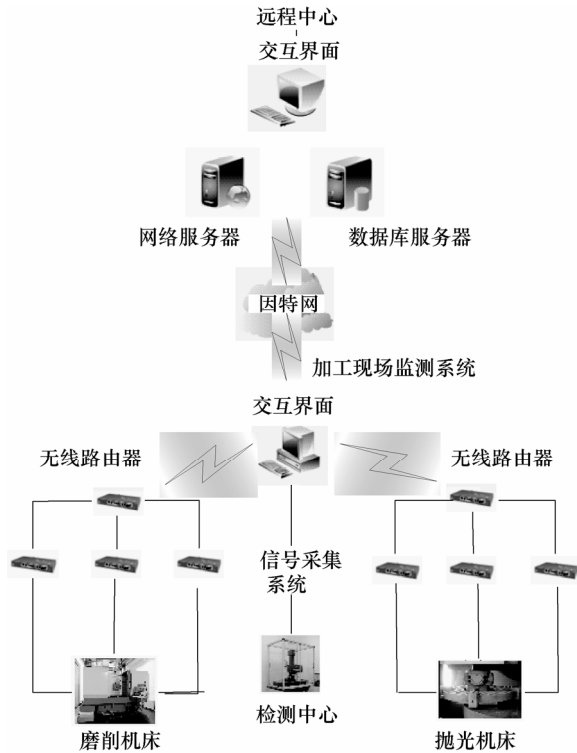


图 9 精密磨床环境监控系统总体框架

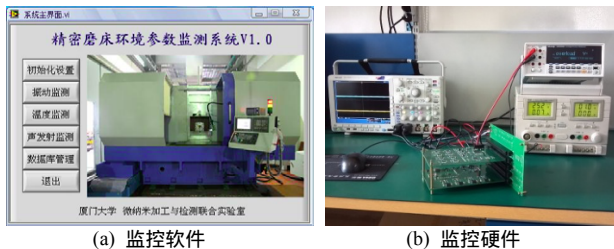


图 10 精密磨床环境监控系统

## 6 光学元件中频误差检测与评价技术

随着光学元件制造技术水平不断提高，寻求能与之相适应的光学表面评价方法是十分必要的。美国利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Lab, LLNL)提出将元件面形误差划分为 3 个不同的空间频率区域以实现对大口径光学元件的表面质量进行全空间频段评价，即低频段、中频段和高频段误差。

对于低频段及高频段误差，评价标准已沿用很久，通常采用传统的评价指标如 PV 值、方均根(Root mean square, RMS)值，表面粗糙度  $R_a$  值即可评价，

而对于中频误差的评价，过去很长一段时间都处于空白阶段。直到 20 世纪末美国 LLNL 实验室才提出采用功率谱密度(Power spectral density, PSD)曲线来作为光学元件中频误差的评价指标。PSD 曲线能提供丰富的被测表面面形特征信息，其实质是傅里叶频谱分析，即表面各频率分量傅里叶频谱振幅的平方，因此可以定量地给出被测光学元件表面误差的空间频率分布情况，而且评价结果直观。美国 LLNL 实验室给出了对于美国的国家点火设施(National ignition facility, NIF)工程光学元件中频误差的判别曲线，对照判别曲线即可在坐标图上清晰看出评价结果，并可读出不合格中频的频率范围，进而分析误差的产生原因，修正误差及改进加工方法。本课题组对 PSD 的原理及计算方法进行充分研究，利用其评价光学元件的优势，建立光学元件表面误差评价体系，并将它运用到中频误差评价中，实现一维及二维功率谱密度曲线的计算，并依照中频误差判别曲线，成功对大口径元件进行了定性和定量的评价，如图 11 所示。

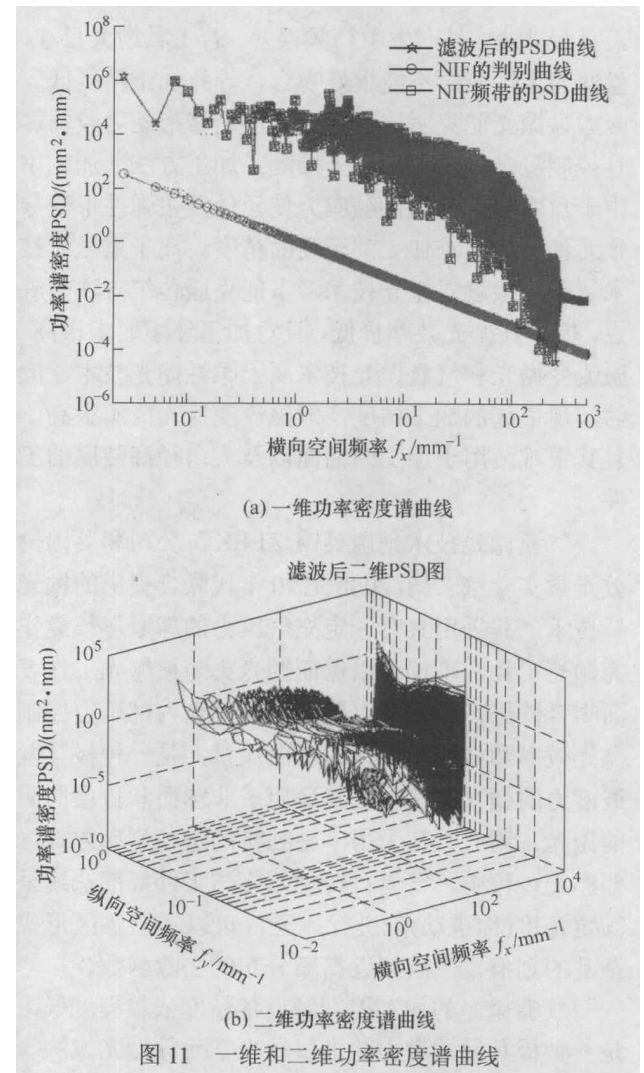


图 11 一维和二维功率谱密度谱曲线

同时，本课题组利用经验模态分解(Empirical

mode decomposition, EMD)技术,对光学表面拟合残差进行自适应分解,得到一系列固有模态函数(Intrinsic mode function, IMF),根据各阶IMF特征,可以识别不同空间位置存在的中频误差及其频率特征,并将其合成得到光学表面的中、高频误差。图12是精磨光学非球面元件表面垂直于加工轨迹方向检测数据的分析结果。将加工轨迹数据非球面拟合之后的拟合残差进行EMD分解,得到13阶IMF,其中第7、8阶IMF在边缘部分出现显著波动,由此可以准确判断局部波动方位。如图13所示,根据各阶IMF的平均空间频率合成得到光学表面的中、高频误差,以及包含低频误差的面形曲线<sup>[12]</sup>。

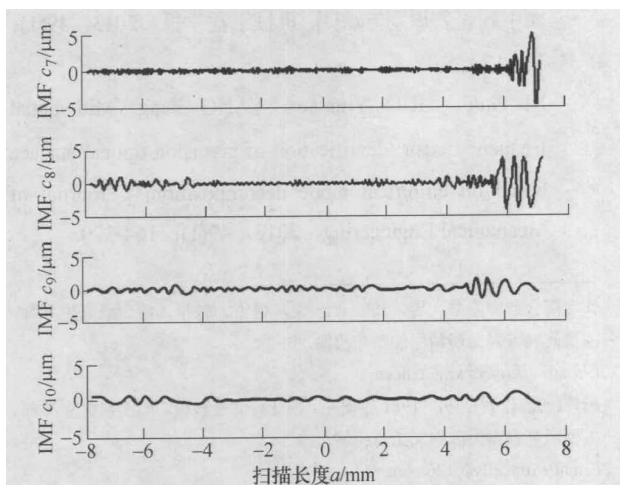


图12 光学表面数据经验模态分解

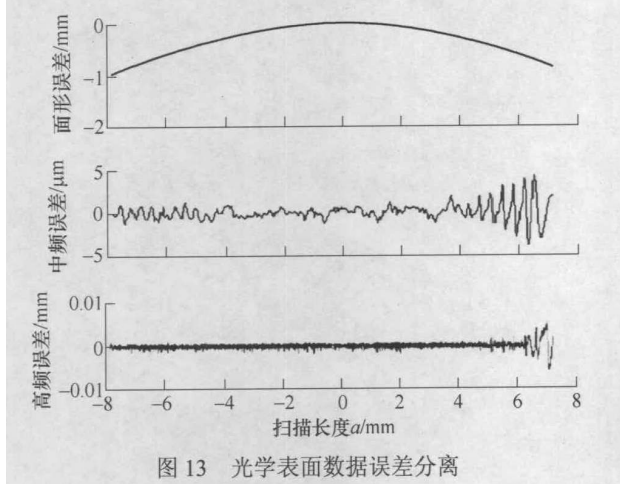


图13 光学表面数据误差分离

## 7 结论

大口径光学元件超精密加工技术研究与应用是一项综合性系统工程,它涉及机床、控制、工具、检测、材料、环境控制、误差评价等各个方面,随着与其相应的超精密加工装备、超精密测量及环境控制等技术水平的不断提高,达到纳米级尺度的加

工已经实现,其发展趋势为:探索新加工方法、高精度化、数控编程自动化、加工检测一体化。

对于超精密机床制造而言,除了进一步提高精度外的最重要发展方向就是多功能和高效,即发展模块化复合机床,最终目的是直接加工出能达到要求的高表面质量和面形精度的各类材料光学元件。国外不少机床企业已将超精密车削、磨削、研磨以及抛光加工集成为一体,并且研制出超精密模块化复合加工机床。从工艺角度而言,在突破大口径加工装备制造水平的基础上,重点研究多轴控制技术、高效加工技术、面形质量控制技术和控制系统软件开发方面的关键技术。

随着国家重要光学工程、国防军事等尖端技术领域的需求,我国科研工作者在已有研究基础上进行技术攻关,实现完善的设备和工艺研究,必将最终打破国外技术封锁,全面提升我国超精密加工能力。

## 参 考 文 献

- [1] 林晓辉,王振忠,郭隐彪,等.矩形非球面圆弧半径误差分离及补偿技术[J].强激光与离子束,2013,25(1):17-21.  
LIN Xiaohui, WANG Zhenzhong, GUO Yinbiao, et al. Arc error separation and compensation technology of rectangular aspheric surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 17-21.
- [2] 林晓辉,王振忠,郭隐彪,等.光学非球面磨削中的圆弧砂轮修整误差分析[J].兵工学报,2013,34(1):60-65.  
LIN Xiaohui, WANG Zhenzhong, GUO Yinbiao, et al. Truing error analysis of arc wheel in optical aspheric grinding[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 60-65.
- [3] LI Yaguo, ZHENG Nan, HOU Jing, et al. Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts Bound-abrasive grinding[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 2066-2073.
- [4] ZHU Yonglu, GUO Yinbiao, KE Xiaolong, et al. Device and method for large size aspheric measurement[C]// International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2009, Zhuhai, Germany: Trans. Tech. Publications, 2010: 4324-4327.
- [5] KE Xiaolong, GUO Yinbiao, PAN Kun, et al. Research on high-precision measurement platform for optical aspheric surface and corresponding error compensation[C]// International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2009, Zhuhai, China. Germany: Trans. Tech.

- Publications , 2010 : 4277-4281.
- [6] ZHU Yonglu , GUO Yinbiao , LUO Wei , et al. Design of large-size aspheric measurement system and motion accuracy analysis[C/CD]// 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies : Optical Test and Measurement Technology and Equipment , 2010 , Dalian , China. United States : SPIE , 2010.
- [7] WALKER D D , BROOKS D , KING A , et al. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optics Express , 2003 , 11(8) : 958-964.
- [8] BINGHAM R G , WALKER D D , KING D L , et al. Novel automated process for aspheric surfaces[C]//Current developments in lens design and optical systems engineering , August 2-4 , 2000 , San Diego , CA , United States. Bellingham : SPIE , 2000 : 445-450.
- [9] PAN R , WANG Z Z , WANG C J , et al. Optimization of key technological parameters in bonnet polishing using fea[J]. Journal of The Chinese Society of Mechanical Engineers , 2012 , 33(5) : 373-382.
- [10] 潘日 , 王振忠 , 郭隐彪 , 等. 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制[J]. 机械工程学报 , 2012 , 48(11) : 183-190.
- PAN Ri , WANG Zhenzhong , GUO Yinbiao , et al. Movement modeling and control of precession mechanism for bonnet tool polishing large aissymmetrical aspheric lenses[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2012 , 48(11) : 183-190.
- [11] BI Guo , GUO Yinbiao , LIN Jing. Principles of an in-process monitoring system for precision grinding machine[C]//2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering , 2011 , Inner Mongolia, China. United States : IEEE Computer Society , 2011 : 7546-7549.
- [12] 毕果 , 郭隐彪 , 杨峰. 基于经验模态分解的精密光学表面中频误差识别方法[J]. 机械工程学报 , 2013 , 49(1) : 164-170.
- BI Guo , GUO Yinbiao , YANG Feng. Mid-spatial frequency error identification of precision optical surface based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2013 , 49(1) : 164-170.

---

作者简介: 郭隐彪, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为超精密加工与检测。

E-mail : guoyb@xmu.edu.cn

杨炜(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 助理教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为微纳加工与检测。

E-mail : oncefly@126.com