

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0170-03

# 大型非球面制造技术进展

杨力, 袁家虎, 姜文汉, 伍凡, 曾志革, 郑耀, 凌宁

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 报导了大型非球面制造技术的进展及能动磨盘面形变化的计算机仿真与检测台上的实时动态面形测量实验研究进展。讨论了CCOM1600计算机数控组合光学加工机床和CCAL1600计算机数控能动盘光学加工机床的设计原则。介绍了所完成的若干基础研究工作,包括:数控软件研究与开发;利用有限元法对大镜静态自重变形与加工中的受力变形进行了分析研究;实验研究了精磨阶段的大镜的粗糙表面面形的接触式测量方法。

**关键词** 光学技术与仪器; 计算机数控组合光学加工机床; 计算机数控能动盘光学加工机床; 有限元法; 粗糙表面面形接触式测量; 能动磨盘

中图分类号 TP202.7

文献标识码 A

## Development of Aspheric Surface Manufacturing Technology

YANG Li, YUAN Jia-hu, JIANG Wen-han, WU Fan, ZHEN Zhi-ge, Zhen Yao, LING Nin

(Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Shichuan 610209, China)

**Abstract** The developments of aspheric surface manufacturing technology are reported. The design principle of couple of new computer numeric control machine model of CCOM1600 and CCAL1600 are discussed. Some basic research works are investigated, including: CNC software; some calculation on the deformation of the mirror being manufactured in the statue of statistic as well the suffered under the manufacturing force by the means of finite element analysis.

**Key words** optical technique and instrument; computer control integration optical machine; computer control active lap machine; finite element analysis; contact measurement of rough surface; active lap

### 1 引言

近年来,随着中国科学院创新机制的推动和国家高技术发展的牵引,中国科学院光电技术研究所大型非球面制造技术得到了长足进展,用熔石英玻璃熔接法已成功制造了一系列轻型反射镜镜坯,也包括多边形平面反射镜镜坯,其中最大非球面轻质镜尺寸为直径 $\phi 1300$  mm,相对口径1:2,减重比70%,用于光电所研制的光学系统中。近年研制成功的CCOM1600计算机数控组合光学加工机床和CCAL1600计算机数控能动盘光学加工机床,这两台机床的设计原则是基于作者们所获得的中国实用新型专利“计算机数字控制大型集成光学加工机构”ZL00222641.3。其基本创意是,把采用数控粗磨金刚石砂轮倾斜单刃铣磨非球面初成形与精磨金刚石砂轮倾斜单刃铣磨非球面精成形,与数控小工具精磨与抛光,能动磨盘精磨与抛光,经典法精磨与抛光组合在一台集成加工中心上,实现多功能加工方法的

综合与交叉。同时加强基础研究工作和基础设施建设:包括光电所自主研发成功的用于波前实时探测的二维动态哈特曼传感器,可方便地用于大镜加工现场检测;计算机数字控制非球面加工软件研究与开发;基于有限元分析方法的在一定支承条件下的大镜静态支承变形与采用经典法抛光时在抛光盘作用下的动态受力变形;在加工过程中的精磨阶段的粗糙表面的面形接触测量方法研究,如所周知,精磨工序对数控加工技术而言是至关重要的一环。与此同时开展了能动磨盘的实验研究,取得了积极的进展和阶段性成果。

### 2 大型非球面制造技术装备建设

CCOM1600计算机数控组合光学加工机床和CCAL1600计算机数控能动盘光学加工机床外形照片见图1。

两台机床设计的独到之处很多,此处不一一列

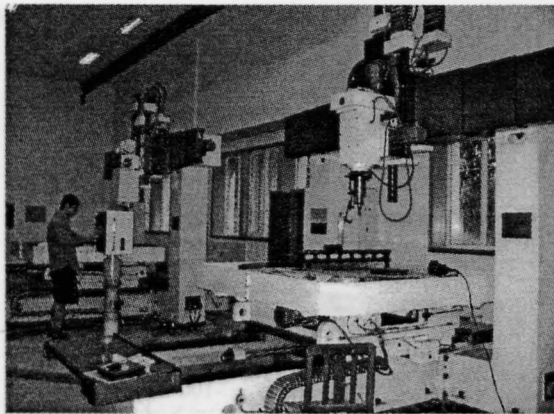


图1 CCOM1600 计算机数控组合光学加工机床与 CCAL1600 计算机数控能动盘光学加工机床  
Fig.1 CCOM1600 computer numeric control integration optical manufacturing machine and CCAL1600 computer numeric control active lap optical manufacturing machine

举,其中小工具磨头的自转和公转机构采用了软轴设计,结构新颖紧凑。机床的总体结构及精度水平可供精磨阶段的粗糙表面实现在线接触式测量。

计算机数控能动盘光学加工机床除一般意义上的数控机床的要求之外,更需考虑到与能动盘之间的机电一体化连接,上下位控制计算机之间的通讯,能动盘盘载系统的电信号的静动转换等等。

### 3 若干基础研究工作

#### 3.1 小工具与应力盘数控加工的工艺软件与工艺流程研究

关于数控小工具抛光数学模型与工艺软件的研究已有大量的参考文献<sup>[4]</sup>,但有一点需指出,任何数控光学加工工艺软件必须同数控光学机床的结构、设计、功能与拟采用的工艺流程紧密相关,软件必须服务于工艺。

简要讨论能动盘的工艺算法,经推导得到能动盘的去除函数为

$$R(r) = KP\omega_1 e \int_0^T [(1-\omega)^2 r^2 + \omega^2 - 2r(\omega^2 - \omega)\cos(\omega t)]^{1/2} dt \quad (1)$$

其中  $\omega = \omega_2/\omega_1$ ,  $r = r_1/e$ ,  $\omega_1$  为工件转动角速度;  $\omega_2$  为应力盘转动角速度;  $e$  为工件与应力盘的偏心距;  $r_1$  为在工件上某被加工点 A 的半径;  $r_2$  为点 A 距应力盘中心距离;  $R$  为应力盘半口径。

能动盘的磨损函数为

$$R(r') =$$

$$KP\omega_2 e \int_0^T [(1-\omega')^2 r'^2 + \omega'^2 - 2r'(\omega'^2 - \omega')\cos(\omega' t)]^{1/2} dt \quad (2)$$

其中:  $\omega' = \omega_1/\omega_2$ ,  $r' = r_1/e$ 。

显然,当  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  时应力盘的去除函数简化为

$$R(r') = \int_0^T KP\omega e dt = KP\omega e T \quad (3)$$

应力盘的磨损函数变为

$$R(r) = \int_0^T KP\omega e dt = 2KPearccos[(r_1^2 + e^2 - R^2)/2r_1 e] \quad (4)$$

表明,当工件与应力盘转速相同时,应力盘盘面各点均匀磨损,相应于加工表面亦均匀磨损,这是一个十分重要的工艺条件,应力盘去除特性曲线是一条有唯一峰值的接近高斯分布的光滑曲线,改变工件与应力盘的转速比,将使应力盘去除函数和磨损函数发生相应变化。

研究给出如下大镜数控加工工艺流程,以精度指标的分配为代表:粗磨加工成形为 0.1 mm,数控金刚石微细砂论精磨成形为 0.01 mm,数控小工具或能动盘加微细金刚石精磨为 0.001 mm,数控小工具或能动盘抛光为 0.0001 mm(rms-20 nm)。每道数控加工工序把表面面形精度较前道工序提高一个数量级。显然,数控精磨和精磨阶段是整个工艺过程的承上启下的关键环节。

#### 3.2 大镜加工中的支撑与受力变形有限元分析研究

已发表的有限元分析的一般的研究工作偏重于镜面的自重静态变形研究,其研究结果的参考价值有限。这里讨论用有限元法对加工过程中镜面的受力变形分析,更接近于工程实际应用。对直径  $\phi 1300$  mm 蜂巢结构熔石英轻质镜在几种不同的支承条件下的静态自重变形和抛光盘施力(正压力与表面剪切力)情况下的动态变形的分析结果,有利于大镜的支承结构的合理选择,同时也有利于对加工过程的受力变化情况的研究。这里给出一组典型数据列于表 1。

表 1 十八点支撑结构下,镜面自重与加工变形

Table 1 Mirror deformation under the gravity and shearing manufacturing force

	变形量( $\lambda$ , $\lambda = 632.8$ nm)
自重变形	0.0309
磨盘零摆幅时变形	0.0793
磨盘摆幅 1/3 口径时变形	0.1100

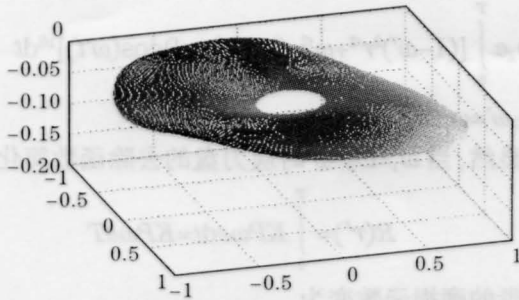


图2 十八点支撑结构下,磨盘 1/3 摆幅时的镜面面形图  
Fig.2 Surface deformation under the shearing force and gravity of the lap at the position of 1/3 full aperture of the mirror

基于上述有限元分析方法,对于大镜支承方案的选择提供了一定的理论依据,对加工中磨盘的重力和剪切力所带来的主镜的加工受力变形的研究对指导光学加工有重要意义。

### 3.3 接触式粗糙表面面形测量

大镜数控加工中的精磨阶段的面形检测属粗糙表面(毛面)测量范畴,在有条件时使用红外干涉仪或采用高质量的商用三坐标测量机进行毛面面形检测并指导精磨加工过程是十分合理的选择。光电所几年来的接触式面形测量研究工作是用于指导大镜在精磨阶段的在线检测。

## 4 能动磨盘应用基础研究

中国科学院光电所近年开展了口径 500 mm 12 个驱动器能动磨盘研究研制<sup>[2]</sup>。计算机仿真采用的有限元数学模型参见图 3。

在无偏心时取 80%有效口径拟合残差为  $pv=0.75 \mu\text{m}$ ,  $rms=0.32 \mu\text{m}$ 。在应力盘平移到  $R/3$  时的拟合残差参见图 4。

在能动盘测量台上所作的半动态实验给出了令人鼓舞的实验结果,参见图 5。

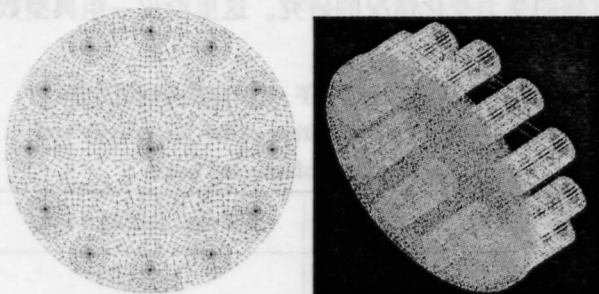


图3 能动磨盘变形仿真有限元模型  
Fig.3 The mode of finite elements analysis for the imitation to the deformation of active lap

大量的实验数据表明在能动盘各个典型的离轴

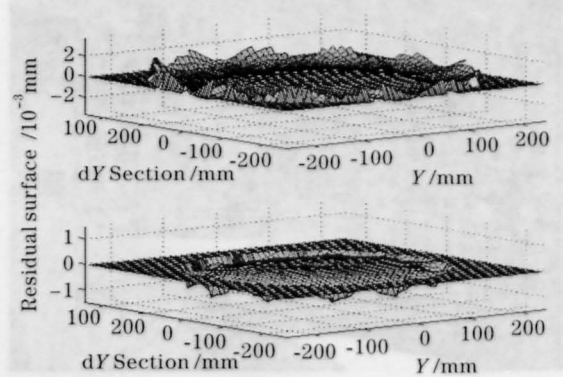


图4 盘平移离心  $R/3$  时拟合残差图,全口径  $pv=2.11 \mu\text{m}$ ,  $rms=0.43 \mu\text{m}$ ;取能动盘 80%有效口径时  $pv=0.32 \mu\text{m}$ ,  $rms=0.12 \mu\text{m}$   
Fig.4 Residue error of fitting at  $R/3$ ,  $pv=2.11 \mu\text{m}$ ,  $rms=0.43 \mu\text{m}$  with full aperture;  $pv=0.32 \mu\text{m}$ ,  $rms=0.12 \mu\text{m}$  with 80% aperture

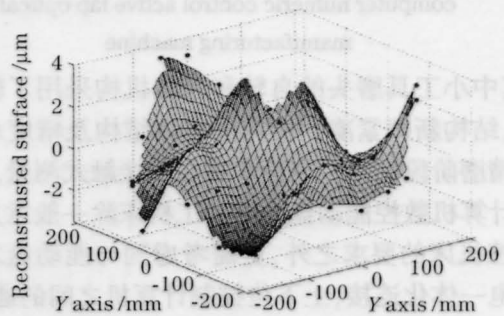


图5 实测盘能动变形残差:  $pv=5.3 \mu\text{m}$ ,  $rms=1.2 \mu\text{m}$   
Fig.5 The results of active deformation residue error of the lap by practical measuring on the testing table

位置和盘的各个设定的转角位置上的盘能动变形精度在  $rms=2 \mu\text{m}$  以内,重复精度在  $rms=1 \mu\text{m}$  以内,国外文献发表的数据为应力盘控制变形的重复精度在  $rms=4 \mu\text{m}$  以内<sup>[3]</sup>。

致谢 参加此项研究工作的主要研究人员还有: 李晓今、邓建民、吴时彬、吴永前、万勇建、范斌、高平起等。本报告还引用了吴永前有限元分析和唐建冠的接触式测量学位论文中的部分数据或图片。中国科学院光电所领导在非球面先进制造技术发展方面给予了有力的支持。本文报告的研究工作也得到国家高技术给予的积极支持。笔者在此一并表示诚挚感谢。

### 参考文献

- 1 杨力主编. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 杨力, 姜文汉. 计算机控制抛光大口径高陡度非球面技术研究[J]. 光电工程, 1999, 26(1): 4~15
- 3 S. C. West, H. M. Martin, R. H. Nagel et al.. Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(34): 8094~8100