

# FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统\*

张学军 张云峰 余景池 张忠玉

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要** 详细介绍了本所自行研制的、国内首台非球面自动加工及在线检测机床 FSGJ-1。重点讨论了研制过程中的技术难点及解决方案, 同时给出了加工实例及国内外对比情况。

**关键词:** 非球面; 自动加工; 在线检测

## 1 引言

在光学系统中应用非球面可以减少光学元件的数量和重量, 缩小系统的尺寸, 降低成本并改善像质等。但由于检测及加工的难度使其长期不能应用于高质量的成像系统中。同时随着现代科技的发展, 非球面在高科技民用领域, 如办公自动化设备和照相机变焦镜等方面的应用也日益广泛。这些都促使高精度非球面的加工及检测成为亟待解决的问题。

当前国际上以美国为首的一些发达国家利用数控技术及在线测量技术已经实现了大口径非球面的自动加工, 最大加工直径为4 m, 面形精度为  $\lambda/20$  mm s, 并且加工周期大幅度缩短, 以 Itek 公司为代表的一些制造商已经建成了数控光学加工中心, 并声称将在下一世纪完全取代手工加工。而在“八五”期间我国光学加工仍以传统的手工加工为主, 靠加工技师的经验来保证质量, 劳动强度大。这显然不符合国际上光学加工的发展潮流。

长春光机所经过三年的努力, 终于设计并加工出了国内乃

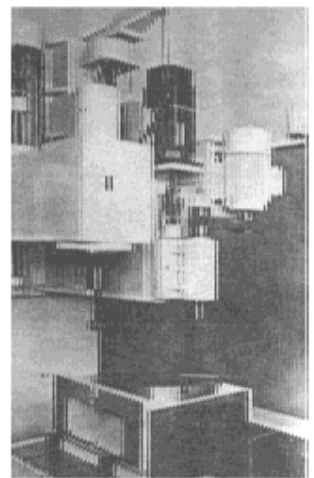


Fig 1 FSGJ-1 A spheres automatic fabrication machine

\* 收稿日期: 1996年10月7日  
科学院85重点课题

至世界上首台集铣磨成形、精细磨、抛光及在线检测于一体的四轴联动非球面加工机床 FSGJ-1, 见图1。在该机床上可以完成从铣磨成形、内孔磨边、倒角、粗细磨直到抛光的一整套加工过程。其铣磨精度为  $\pm 0.02 \text{ mm}$ , 抛光精度为: 面形误差小于  $\lambda/20 \text{ nm}$ 。

## 2 FSGJ-1研制过程中的技术难点及解决方案

### 2.1 面形误差向终极目标收敛的最佳方案研究

本项目的核心技术是计算机控制光学抛光技术 (Computer-Controlled Optical Polishing, 简称 CCOP), 其基本原理是采用计算机控制一个比工件尺寸小得多的小磨头, 按一定轨迹在其表面上移动来完成抛光。材料的去除量决定于抛光液的浓度、磨头与工件间压力、相对运动速度、磨头的停留时间以及磨头与工件的吻合度等因素。在研究过程中, 我们经过理论分析及试验研究, 决定采用控制磨头在工件表面不同区域的停留时间, 而保持其他参数不变以达到定量控制去除量的方案。这样做机床的结构相对简单, 同时由于控制量单一, 容易控制。目前国际上一些先进国家的 CCOP 加工大都采用这一方案。

众所周知, 光学加工的实践性非常强, 加工过程受工艺条件、环境等因素的影响较大, 因此与理论模型往往存在很大差距, 面形误差的收敛速度不是像预计的那样快, 有时在一定阶段收敛过程会停止不前, 这是影响计算机控制抛光技术可靠性的一大障碍。我们在大量工艺实验的基础上, 提出了 CCOP 工艺参数的优化方案, 对理论控制模型进行了合理的修正, 使加工精度及效率以大幅度提高。具体内容包括:

#### 2.1.1 精磨后工件的表面质量研究

精磨后工件表面质量的好与坏将直接影响到抛光过程的效率及精度。一般采用散粒磨料精磨后都会在被加工工件的下表面留下一定深度的破坏层 (Subsurface Damage Layer), 必须在抛光阶段予以去除, 但破坏层过深将大大延长抛光周期, 降低其效率; 另外利用该方法精磨后的工件表面光洁度往往较低, 不能直接进行干涉计量, 这给定量控制抛光带来了困难, 经过

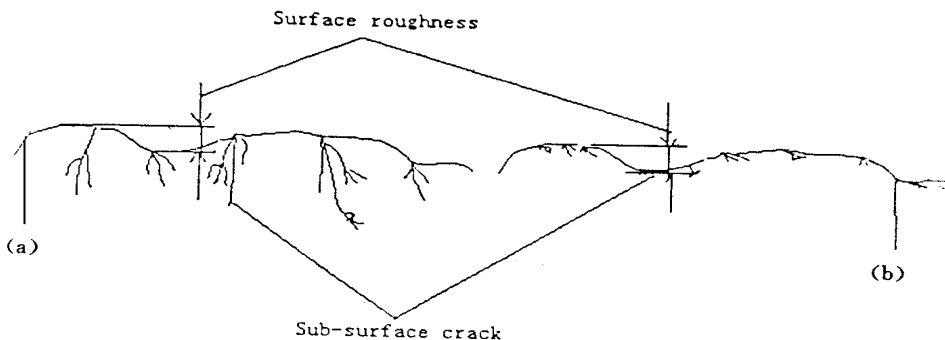


Fig. 2 Surface quality after fine grinding  
Different surface structures after BDA G and LDA G

工艺实验,我们决定采用固着金刚石磨料(Bound Diamond Abrasives Grinding, BDA G)而不是传统的散粒磨料(Losse Diamond Abrasives Grinding, LDA G)进行精磨,不但使下表面破坏层深度降到最低,而且大大提高了表面光洁度,使精磨表面可直接进行干涉计量,这一结果大大提高了加工精度及效率。其结果见图2。

### 2.1.2 边缘效应(Edge effect)的控制

利用CCOP方法加工当磨头移动到工件边缘时,由于工作状态的改变使得工件边缘出现“塌边”(Down edge)或“翘边”(Up edge)现象,通常称作边缘效应,这一直是CCOP的技术难点,它的存在使面形误差很难在边缘收敛。

我们通过理论分析,得出了控制边缘材料去除量的修正方程,并在此基础上进行了克服边缘效应的抛光实验,取得了令人满意的效果,“塌边”和“翘边”都得到了很好的控制。

### 2.1.3 抛光头尺寸、压力和速度的变化以及抛光液浓度的变化对面形误差收敛的影响

通过工艺实验得出了上述工艺参数的最佳组合,以此为基础制定的加工方案能够使面形误差以最快的速度收敛。

不同尺寸的抛光头适用于不同形式的面形误差。从理论上讲,抛光头的尺寸越小,则其在运动轨迹上的抛去量与理论模型符合得就越好,面形误差也就越容易收敛。但在实际抛光过程中抛光头不可能做得很小,因此实际抛去量与理论抛去量之间存在一定的偏差。一般来说,一个光滑连续的光学表面可以表示成Zernike多项式的线性组合:即:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n A_i U_i(x, y)$$

其中,  $A_i$  为多项式系数,  $U_i$  为Zernike多项式的第  $i$  项。在实际应用当中取36项Zernike多项式即可表示被加工光学表面的误差分布。对于一个合格的光学表面,其高次项的系数特别是第30至36应趋于0。我们在加工过程中发现,当磨头尺寸很小时,虽然面形误差在开始阶段能够以很快的速度收敛,但由于小磨头加工过程中的非连续作用,而引入了一些高次像差,使得Zernike多项式的第30至36项系数增大,这样一来面形误差虽已达到要求,但表面却存在微小“切带”,同时面形误差也很难进一步收敛。这一直是国际上CCOP加工过程中普遍存在的现象,属技术难点之一。我们通过大量工艺试验得出结论:即适当地增加磨头尺寸可以在很大程度上克服这一现象,并且通过大小磨头的交替使用可以大大提高面形误差的收敛速度。抛光头与被加工

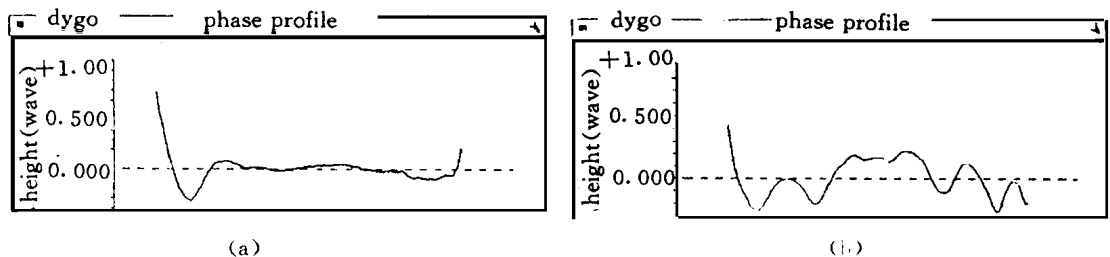


Fig. 3 Effect of tool size on the polishing results

(a) Surface profile polished by Tool# 1 (Toll diameter/workpiece diameter: 1/4)

(b) Surface profile polished by Tool# 2 (Toll diameter/workpiece diameter: 1/20)

工件直径比的变化范围应为:  $1/20 \sim 1/4$ 左右。图3显示了大小磨头间的加工结果,可以看出大磨头对于消除高次像差是很有成效的。注意:这里所说的“大”只是相对的“大”,与传统的手工抛光相比仍是小磨头。

当保持压力、磨头转速及其他工艺参数不变时,面形误差的去除量应为磨头的工作函数  $R(x, y)$  与磨头的驻留时间函数  $D(x, y)$  沿磨头移动路径的卷积,即:

$$E(x, y) = \int_{path} R(x, y) \cdot D(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta$$

应用上述模型指导抛光时,压力  $P$ 、磨头转速  $\omega$  应根据玻璃材料及不同的面形误差加以修正,所说的压力、磨头转速恒定指对于特定玻璃材料,在特定的误差范围内保持压力、磨头转速不变。它们之间的关系可用下式表示:

$$P_n = k \frac{E_n}{E_0} P_0$$

$$\omega_n = \frac{E_n}{E_0} \omega_0$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

上式中  $E_0, P_0, \omega_0$  为初始面形误差、压力及磨头转速,  $E_n, P_n, \omega_n$  为  $n$  状态下的面形误差、压力及磨头转速,  $k$  为与材料、温度及抛光液成分等因素有关的因数。在此基础上,我们在 FSGJ-1型非球面自动加工中心上成功地加工出一面直径为 200 mm 的抛物镜(K<sub>9</sub>玻璃),面形精度达  $1/20 \lambda$  rms,有效抛光时间为30小时,此精度与美国 Itek 公司1995年的报道处于同一水平。图4为实际误差收敛曲线。

2.1.4 抛光头运动轨迹对加工结果的影响

对抛光头的两种运动轨迹:螺旋线及  $X - Y$  直角坐标运动方式分别进行了理论分析及工艺实验,发现它们适用于不同的面形误差结构。 $X - Y$  运动方式适合消除回转对称误差,而螺旋线运动方式则适合于非回转对称误差的修正,见图5。

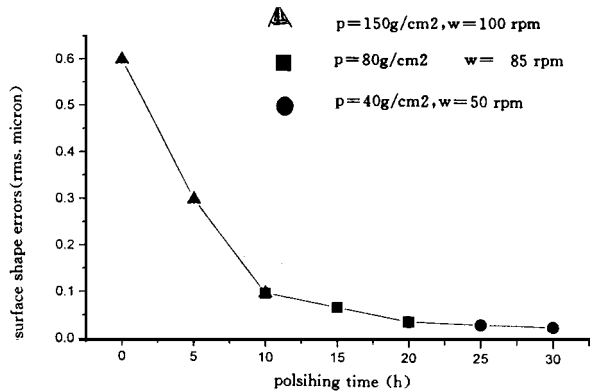
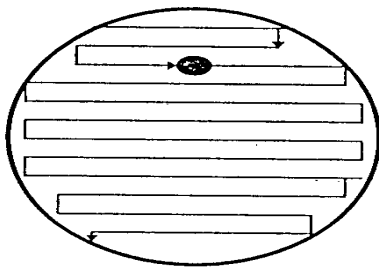
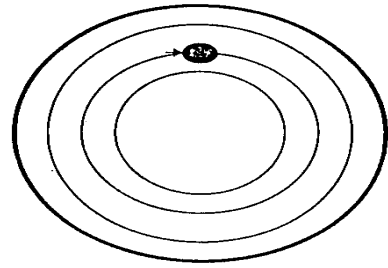


Fig 4 Actual convergence curve



(a)



(b)

Fig 5 Two tool's paths

(a) The x-y path (b) The helix path

### 2.1.5 超光滑表面的研制

我们通过大量工艺实验,加工出一个超光滑平面,其表面粗糙度小于2 nm,与美国 Iteck 公司的加工结果处于同一水平,加工方法为浸液抛光,结果如图6所示。

### 2.1.6 CCOP 控制软件的研制

在 CCOP 的理论模型及工艺实验的基础上,我们用 Visual C++ 4.0 在 Windows'95 下开发了一套 CCOP 的控制软件 Polishing 1.5。该软件可根据面形误差的检测结

果,迅速生成 FSGJ-1 机床的 CNC 文件。操作者可根据需要修改时间常数、加工区域、加工方向等参数,并产生不同的加工轨迹。该软件具有美观实用的用户界面,非常利于操作,目前使用效果良好。

### 2.2 在线检测用剪切干涉仪及数据处理软件的研制

CCOP 技术依赖于定量检测结果,这也是该技术与传统手工抛光最大的不同之处。特别是精磨后面形误差的定量检测,对于控制面形误差收敛,提高 CCOP 的加工精度及效率有重要作用。然而,精磨后的面形一般都较差,用普通干涉仪检测时条纹非常多,很难提取出数据。为此,我们研制了一台径向数字剪切干涉仪,专门用于精磨、粗抛阶段的定量在线检测。

我们用 Visual C++ 4.0 在 Windows'95 下开发一套干涉图数据处理软件 DataPro 2.0。它是一个全32位的 Windows'95 程序,分析一张干涉图仅用2-3秒钟,这样的速度在同类软件中是较快的。其计算精度经验证与美国的 Zygo Mark IV XP 处于同一水平,另外它还具有手工判读条纹、MTF 及 PSF 计算、系统误差消除等实用功能,大大方便了用户。

## 3 FSGJ-1 的各项技术指标与国内外先进水平的对比

研制出了国内乃至世界上首台集铣磨成形、粗细磨、抛光及在线检测于一体的四轴联动非球面加工机床 FSGJ-1,并在该机床上成功地加工出一面直径为200 mm 的抛物镜,而形精度达  $1/20\lambda$  nm s,加工周期为1个半月。图7显示了最终加工结果。

Date: 07/02/96  
Time: 10: 38: 03  
Mag: 10. 3 ×  
Size: 368 × 236  
Sampling: 1. 64 μm  
**Surface Stats:**  
Rq: 2. 19 nm  
Ra: 1. 18 nm  
Rt: 77. 24 nm  
**Items Removed:**  
Tilt  
Filtering: None  
Restore: No  
Ref Sub: No

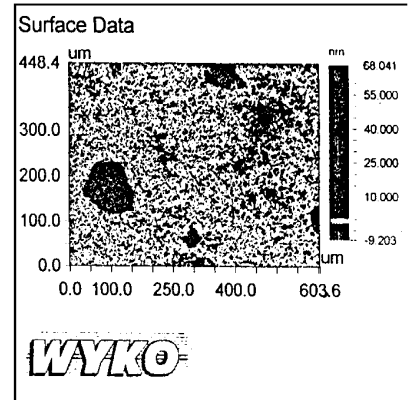


Fig 6 Testing result of Ultra-smooth surface

Table 1 Function of CNC machines

Company or Machine	on-line test function	generation function	maximum of workpiece diameter	ability of surfacing off-axial optics	number of working axial
FSGJ-1 <sup>[2]</sup>	Yes	Yes	0.8 m	Yes	4
Itek (USA) <sup>[3]</sup>	Yes	No	4 m	Yes	5
REOSC (France) <sup>[1]</sup>	No	No	4 m	Yes	5
U SSR <sup>[4]</sup>	No	No	1.5 m	Yes	3
Zhejiang University <sup>[4]</sup>	Yes	No	0.3 m	No	2

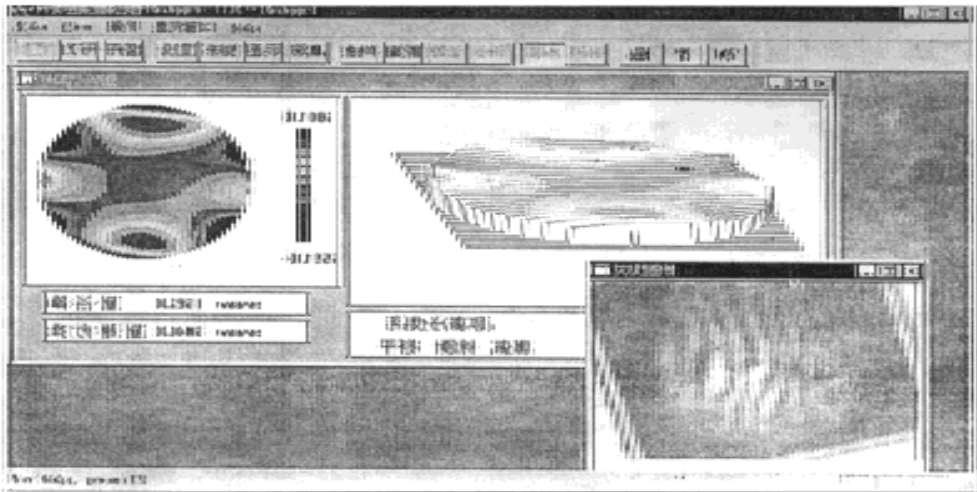


Fig 7 The final polishing result

Table 2 Surface quality after fine grinding

company or machine	methods	surface roughness ( $\mu\text{m}$ )	depth of Sub-surface damage ( $\mu\text{m}$ )	Interferometry test
FSGJ-1 <sup>[2]</sup>	BDAG	0.2	1	Yes
Itek (U SA) <sup>[3]</sup>	LDAG	0.2	1	Yes

Table 3 List of the fabrication accuracy

Company or machine	accuracy of generation ( $\text{m s } \mu\text{m}$ )	accuracy of grinding ( $\text{m s } \mu\text{m}$ )	accuracy of polishing ( $\text{m s } \mu\text{s}$ )	surface roughness ( $\text{nm}$ )
FSGJ-1 <sup>[2]</sup>	10	0.5	0.03	2
Itek (U SA) <sup>[3]</sup>	8	0.2	0.025	2
REOSC (France) <sup>[11]</sup>	10	0.5	0.08	2
U SSR <sup>[4]</sup>	10	0.5	0.035	\
Zhejiang University <sup>[44]</sup>	\	\	0.125	\

通过以上比较可以看出, FSGJ-1的加工精度及某些功能已经接近国际先进水平。

## 4 结 束 语

FSGJ-1非球面加工机床的研制,成功地解决了我国大口径非球面光学零件的加工及检测难题,标志着我国光学加工技术已迈上一个新台阶,同时为光学加工向CAD/CAM一体化方向发展打下了坚实的基础。虽然如此,但我们在很多技术环节上与国际一流水平相比仍存在着差距,具体体现在以下几个方面:

- 1) 超大尺寸光学镜面的加工(4 m 以上);
  - 2) 大尺寸超薄光学镜面的加工(径厚比在于50:1);
  - 3) 大相对孔径非球面的加工。
- 这些都将是今后工作中所要重点解决的问题。

### 参 考 文 献

- [1] Beraud P. Optical Figuring and Testing of the VLT 8.2m primary mirror. Proc SPIE, 1995, **2536**: 413~419
- [2] Zhang Xuejun. Edge Control in Computer Controlled Optical Polishing. Proc SPIE, 1995, **2536**: 239~ 242
- [3] Robert A Jones. Computer Simulation of Smoothing During Computer-controlled Optical Polishing. Applied Optics, 1995, **34**(7): 3346~ 3352
- [4] 曹天宁. 计算机控制抛光成形抛物面. 仪器仪表学报. 1993, **14**(4): 1230~ 1236

## FSGJ-1 Aspheres Automatic Fabrication and on-line Testing System

Zhang Xuejun, Zhang Yunfeng, Yu Jingchi, Zhang Zhongyu

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130022)

### Abstract

In this paper, FSGJ-1, the first Chinese machine for aspheres automatic fabrication and on-line testing was introduced. Technical difficulties encountered in research stage and their solutions were addressed. In addition, a fabrication practice and the comparisons with the world advanced technologies were presented.

**Key words:** Aspheres, Automatic, Fabrication, On-line testing

**张学军**, 男, 1968年9月生, 1990年毕业于吉林工业大学金属材料系, 1993年毕业于长春光机所研究生部, 获硕士学位。现工作在应用光学国家重点实验室, 在职博士生。主要从事光学超精加工及检测, 新材料, 新工艺及计算机应用等方面的研究。做为骨干参加了多项课题的研究工作, 共发表学术论文20余篇。