

用金刚石刀超精车削光学非球面镜

王秀文 张长贵 马文生

摘要: 文章介绍了用金刚石刀超精车削光学非球面镜的方法。分析了在超精车削中影响镜头表面光洁度和圆度、面形精度的因素,其中介绍了机床主轴的非同步误差对表面光洁度的影响,并系统分析产生非同步误差运动的原因和降低非同步误差值的方法,为消除工件装卡变形对加工镜头精度的影响,加工中采用逐点趋近法分步消除工件的装卡变形,从而达到镜头圆度为 $0.35\mu\text{m}$ 的高精度。

一、前 言

利用锋利的天然金刚石刀车削铝合金、铜合金等软金属而获得光学镜面的超精车削技术是六十年代发展起来的一项新的工艺技术,至今已有二十五年的历史。开始时它主要用于宇航电子计算机等尖端科学技术。到七十年代中期才成为光学零件加工的主要工艺手段之一。用金刚石刀车削光学金属镜可以获得较高的反射率,再加上近年来计算机数控(CNC)超精车床的出现,非球面镜的轮廓加工得到较好的解决。

这项工艺技术在光学领域中从加工波长 $10.6\mu\text{m}$ 的二氧化碳激光核聚变用的金属反射镜,扩展到加工红外领域中的各种金属镜和波长 $0.1\sim 30\text{nm}$ 的X射线领域中的非球面镜,用途日趋扩大。

国外用CNC超精车床加工非球面镜的面形精度可达 $0.5\mu\text{m}$,光洁度 $R_{\text{a}} = 0.1\mu\text{m}$ 。对于X射线望远镜上所用的筒式非球面镜的加工一般都有专用设备。英国科学与工程研究学会(SERC)为加工大型X射线望远镜片委托Cranfield精密工程组织(CUPE)研制了一台立式CNC大型超精钻石刀车床,机床已进入验收测试阶段。在该机床上加工外径 $\phi 500\text{mm}$ 的内锥试件其圆度为 $0.4\mu\text{m}$,直线度为 $0.2\mu\text{m}/300\text{mm}$ 。美国加利福尼亚大学劳伦司一里弗摩尔实验室(LLL)加工 $\phi 30\sim \phi 40\text{mm}$ 的X射线望远镜镜片其超精车削圆度为 $0.1\mu\text{m}$,面形精度为 $0.7\mu\text{m}$,表面光洁度 $0.05\mu\text{m}$ 。经抛光后的镜面可成为表面光洁度为 2nm 左右的超光滑表面。国内超精车削工艺技术目前已有较好的进展,北京机床研究所研制成功的超精车削机床加工球面的表面光洁度可达 ∇_{14} 级。不过国内对用金刚石刀超精车削非球面镜的研究工作尚属开始。

本文针对图1所示的抛物面和双曲面镜的技术要求根据对机床误差的系统测量,分析和修正的基本原理,着重分析了在超精车削中影响镜筒表面光洁度和面形精度的主要因素,采取相应措施从而使镜筒的超精车削最好水平达到圆度为 $0.35\mu\text{m}$,在镍磷合金表面上其表面光洁度为 ∇_{12} 级。

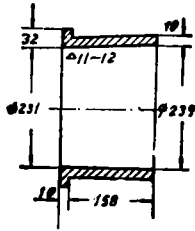


图1 零件简图

二、超精车削中影响表面光洁度的主要因素

影响工件表面光洁度的因素较多。一般可分为两大类，一类是在切削过程中加工工艺系统（机床——刀具——工件）动态特性对表面光洁度的影响，另一类是刀具与工件材料之间所产生的各种物理现象对光洁度的影响，现分述如下：

1. 金刚石刀具切削刃质量对表面光洁度的影响

天然金刚石的物理特性具备了用做超精切削刀具的优越条件。

(1) 刀具的耐磨性高：金刚石是目前已知最硬的物质，它的 *Knoop* 硬度可达 8000~10000，比硬质合金约硬四倍，它的耐磨性比其它任何切削材料要大得多。在超精车削中被切削零件的精度都在小于微米的数量级，刀具的耐磨损性高，无疑也会有利于零件的加工精度。采用金刚石做超精车削刀具是最好的刀具材料。

(2) 具有锋利的切削刃：天然金刚石的组织很纯，又是单晶体共晶结合，这给刃磨锋利的切削刃提供了有利条件。金刚石刀刃理论上可以磨锐到钻石的原子间隙程度达到 0.3 至 0.5 nm 的范围。这是其它颗粒性结构的刀具材料所不及的。用刀具刃口的最小圆角半径来表示刃口的锋利程度，以 $\rho_{m.i.}$ 符号来表示， $\rho_{m.i.}$ 越小说明刀具刃口磨锐得越锋利，金刚石刀具的 $\rho_{m.i.}$ 目前可磨到 0.1~0.01 μm ，而硬质合金刀具 $\rho_{m.i.}$ 为 18~24 μm ，陶瓷刀具 $\rho_{m.i.}$ 为 13~18 μm 。

(3) 金刚石刀具刃口保持性好：金刚石刀具有高的导热性（比铜大 2—6 倍）和低膨胀系数，在切削过程中产生的热量很快被传走，不易膨胀变形，同时金刚石的化学惰性大，与其他物质的亲合力小，切屑不易粘接在刀尖上，这就造成金刚石刀具的刃口形状保持性好。要获得锋利的刀刃，还必须有一整套磨刀技术，这是超精车削工艺技术中的关键。工件切削面的轮廓是由垂直切削方向的平面内刀具轮廓的复制，因此如果切削界面没有干扰存在，刀具刃口轮廓越光滑，就越有形成高光滑表面的能力，金刚石刀具刀刃的刃磨的质量如何，直接影响着加工表面的光洁度。切削刃是切削面与排屑面的交线，其光洁度 R_x 可以由下列公式进行计算

$$R_x = \frac{1}{\sin \beta_x} R_s^2 + 2 R_s R_f \cos \beta_x + R_f^2$$

R_x ——刀刃均方不平度

R_s, R_f ——刀具前面、后面的均方不平度

β_x ——刀具楔角

从上式可以看出刀刃光洁度是由前面、后面的光洁度及楔角决定，当楔角一定时，要提高刀刃的光洁度，就应该提高刀具的前面和后面的光洁度，依照这种分析，在自制的磨刀机上刃磨出直刃刀、圆弧刀。刀具的前角 $\gamma = 0^\circ$ ，后角一般取 $\alpha = 6^\circ$ ，在 $500\times$ 显微镜下观察，刀刃无崩缺、毛刺和裂纹等缺陷。图2所示为磨制的圆弧刀刃形状。

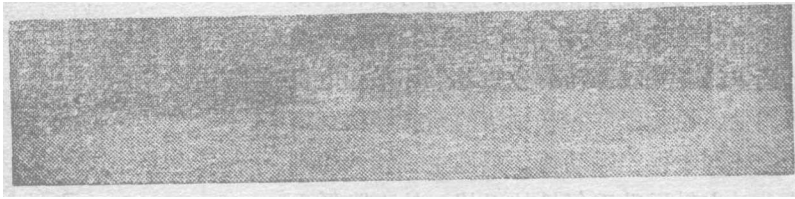


图2 500×圆弧刀刃

图3所示为直刃刀具，经在扫描电镜上检测，其刃口半径 $\rho_{m.i.} < 0.1\mu\text{m}$ 。刀具前面和后面光洁度均超过 $\nabla_{1.4}$ 。用自磨刀具在CG6125超精车床上切削铜、铝合金可获得 $R_a = 0.015\mu\text{m}$ ($\nabla_{1.8}$ 中限)的光洁度。

2. 机床主轴非同步误差运动对表面光洁度影响

我们把主轴回转轴线的全部位置变化，在敏感方向上的变化量，叫做机床主轴的非同步误差。用示波器同步扫描时可以得到如图4的图像。此图像上的不重复厚度(云带)即为非同步误差值。

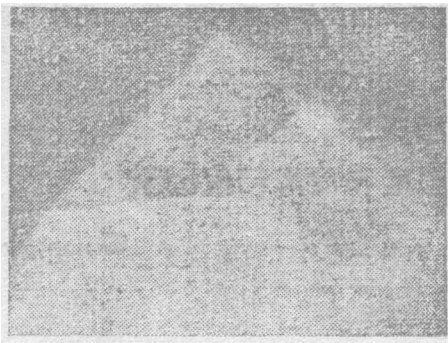


图3 扫描电镜拍摄的刀具刃口半径20000×

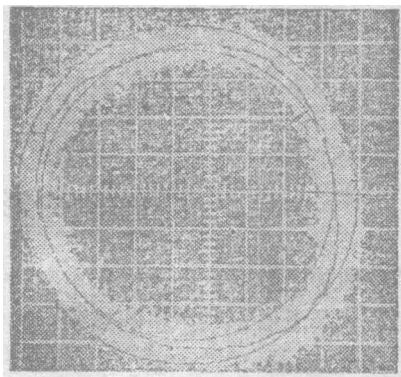


图4

机床在理想状态下工作，零件所获得的表面光洁度为理论光洁度，它的峰谷高度 $P.V$ 与刀尖半径 R 、每转进给量 F 有关：

$$P.V = \frac{F^2}{8R}$$

当 $F < R$ 时可以得到很小的 $P.V$ 值。当机床主轴出现非同步误差运动时，则在连续若干转中零件表面就被切成高低不一的表面。(如图5所示)。由此可见如果尽量减小主轴的非同步误差值就可以大大提高零件的表面光洁度。

机床主轴系统由支持主轴的轴承部分和驱动主轴运动的驱动部分组成。超精车床的主轴轴承目前一般采用液体静压轴承和气体静压轴承两种。如果将静压轴承的介质——油或空气的状态控制好,也就是说控制管路中油或空气是层流而不是紊流,消除油泵脉动。可使轴承部分的非同步误差运动值降低。为了消除油泵的脉动,在油路系统中装上消振器。主轴驱动部分的各个环节如电机的振动、皮带质量、松紧程度和联轴节的精度等都直接影响机床主轴的非同步误差运动值。提高主轴轴承的刚度可以抵制外力对主轴运动重复性的干扰,从而降低主轴非同步误差值,提高加工零件的表面光洁度。

3. 工艺因素对表面光洁度影响

工艺因素包括的内容很多,本文中重点说明工件材料的结构、金相组织的稳定性和微观缺陷等因素对表面光洁度的影响。一般金属材料都具有多晶结构,晶体的各向异性及晶界和杂质的存在,在加工中结晶晶界段差和结晶粒内的滑移变形都会影响超精车削的工件表面光洁度。为此,光学仪器中的金属镜面通常都镀上一层非晶状态结构的镍磷合金来消除多晶结构材料产生的不良影响。由于镍磷合金材料的硬度高于有色金属,不易切削。用圆弧刀切削时则产生高频振动的尖叫声,严重时将金刚石刀具的刃口崩坏,经过多次摸索,采用合理的切削用量,并将圆弧刀改成直刃切削圆弧刃修光的复合刀具,较成功的切削了镀有镍磷合金的非球面镜头。

通过上述工作,车削镀有镍磷合金的非球面镜头光洁度最高可达 ∇_{12} 级,此种表面光洁度可用光学样板来检查工件的面形精度。

三、超精车削中影响镜头圆度和面形精度因素

零件的加工精度取决于机床本身精度和机床一刀具一工件工艺系统受切削力后而产生的弹性变形,受温度影响产生的热变形和零件由于装卡而产生的变形等。

1. 影响镜头圆度的因素

影响镜头圆度的主要因素有两个,一是机床主轴的回转误差,二是零件的装卡变形。主轴的回转误差将直接传递到镜头上,只有靠提高主轴的回转精度才能减小镜头的圆度误差。提高原有机床主轴本身的圆度和轴颈与止推台肩的垂直度,是提高主轴回转精度的有效方法。在修研轴颈与止推台肩的垂直度时,测量的准确度是问题的关键,实际工作中采用轴与孔组合后的回转轴线作为测量基准,不仅有足够的精度而且检测状态与使用状态一致,按检测数据修研止推面,从而保证了测量、加工、使用三个基准的统一。精化结果主轴回转精度小于 $0.2\mu\text{m}$,轴向窜动达 $0.1\mu\text{m}$,轴承刚度达 $7\text{ kgf}/\mu\text{m}$ 满足了镜头加工圆度的要求。

工件装卡误差是加工镜头的误差源。对高精度光学镜头的装卡有两个要求,第一是卡具

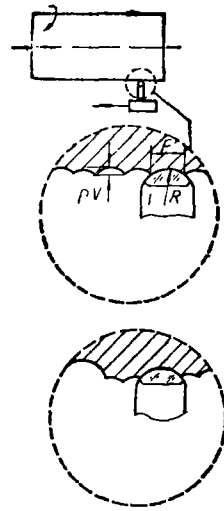


图 5

夹持镜头不得引起或很少引起工件的变形。第二是装卡拆卸容易。使用任何一种装卡方法在镜头上都会引起局部应力，但应尽量减小，根据镜头的具体形状和加工精度要求，采用图6所示机械压板式装卡方式。此种装卡方法采用了球形螺母和增加卡紧力的点数来减小零件的变形。实际加工中可控制装卡变形量小于 $1\mu\text{m}$ 。加工中的圆度采用三点法检测。表1所示的数据和曲线是加工一个镜头经三次装卡切削后所获得的零件圆度数据和曲线。用这种方法装

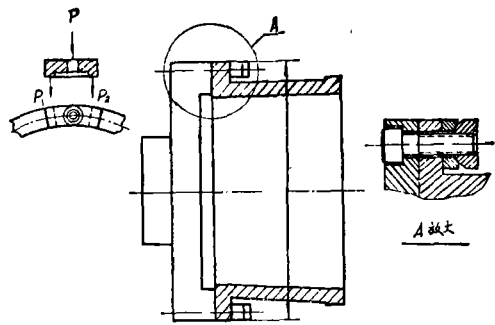
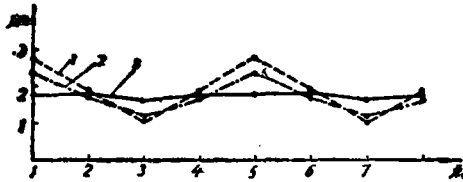


图6 镜头装卡简图

单位：微米

表 1

点 次数	1	2	3	4	5	6	7	8	圆 度
1	2.75	1.9	1	1.85	2.75	1.9	1	1.85	1.75
2	2.35	1.7	1.2	1.65	2.35	1.7	1.2	1.65	1.15
3	1.75	1.8	1.6	1.75	1.75	1.8	1.6	1.75	0.2



卡加工，可以稳定的获得镜头圆度为 $0.5\mu\text{m}$ 。图7是一个镜头超精车削后在 TAYLOR—HOBSON 圆度仪上检测的三个截面圆度，大头截面圆度为 $0.35\mu\text{m}$ ，中间截面圆度为 $0.25\mu\text{m}$ ，小头截面圆度为 $0.35\mu\text{m}$ 。

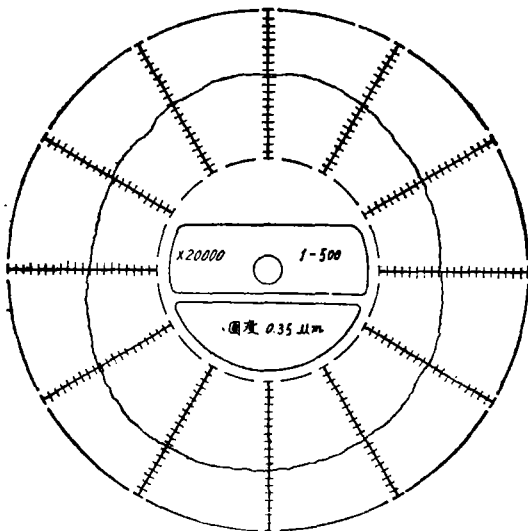


图7a 装卡端截面的圆度

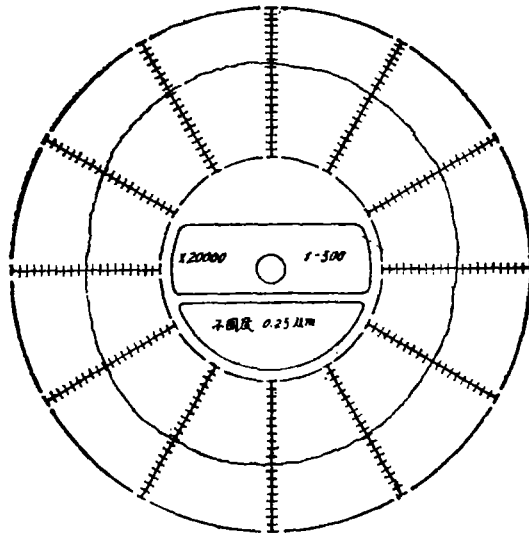


图 7b 中间截面圆度

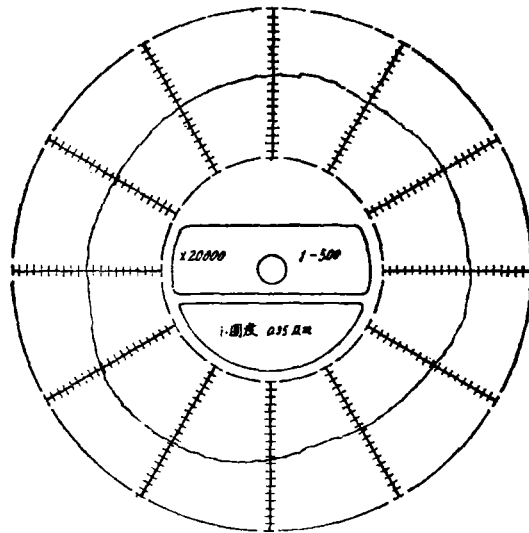


图 7c 悬端截面的圆度

2. 影响镜头面形精度的因素

实现镜头内壁非球面面形的加工方法,有些国家是用具有微时分辨率能力的闭环数控系统,控制刀具的运动轨迹,其面形精度可以达到 $2 \sim 0.5 \mu\text{m}$,我国目前还没有高精度的数控机床,只好采用提高现有机床进给系统精度,用仿形方法来实现非球面的加工。设计了一台带液体静压导轨的仿形刀架,简图如图 8 所示。

此刀架由三个部分组成:一是液体静压进给导轨;二是1:15倍率的放大机构,三是仿形刀架微米级的进刀装置。

仿形刀架影响加工面形精度的误差有以下三个方面:

① 机构中制造误差造成的机构执行件位移误差

A) 靠模板制造误差造成的执行件位移误差：机构中靠模板的制造精度为 0.005mm ，经1:15放大机构后其误差缩小为：

$$\delta_1 = 0.005 \times \frac{1}{15} = 0.3\mu\text{m}$$

B) 由于液压导轨精度产生的执行件位移误差为：

导轨水平方向精度为 $1\mu\text{m}/200\text{mm}$ ，此误差可以放入靠模板的位置调整误差中计算。导轨垂直方向精度为 $10\mu\text{m}/200\text{mm}$ 此误差反映在镜头面形上误差为：

$$\delta_2 \approx 2 \frac{\Delta Z^2}{d}$$

d —被加工零件孔径

ΔZ —导轨在垂直方向上的最大误差

$$\delta_2 = 2 \times \frac{0.01^2}{200} = 0.001\mu\text{m}$$

C) 支点处零件制造误差产生的执行件位移误差：

支点处轴压向孔的一边，孔与轴配研，其不圆度为 $2\mu\text{m}$ ，加工镜头面形时支点只转 1.4° ，计算中取 5° 计算则：

$$\delta_3 = \pm \frac{1\mu\text{m}}{180^\circ} \times 5^\circ = \pm 0.03\mu\text{m}$$

② 安装误差和机构间隙所产生的执行件位移：

A) 靠模板的装调误差

调整样板位置，保证零件锥度，零件锥度由三坐标测量机进行检测，其测量精度即为安装精度的极限

$$\delta_4 = 1 \sim 0.5\mu\text{m}$$

B) 滑块处间隙所造成的执行件位移（见图9），滑块处间隙 $h = 2.5\mu\text{m}$ ，长度 $L = 50\text{mm}$ 。

$$\begin{aligned} \delta_5 &= L - \sqrt{L^2 - h^2} \\ &= 50 - \sqrt{50^2 - 0.0025^2} \\ &= 0.6 \times 10^{-4}\mu\text{m} \end{aligned}$$

③ 机构的刚度和变形所造成的执行件位移

从仿形刀架的结构来分析，静压导轨受力后金刚石刀头相对于镜头的位移直接影响被加工镜头的面形精度。导轨受力后位移大小主要受液体静压导轨支承的刚度影响，该液体静压导轨的刚度为 $6\text{kgf}/\mu\text{m}$ 。导轨上受力按 1kg 计算其位移量为：

$$\delta_6 = 1 / 6 = 0.17\mu\text{m}$$

综上所述其误差为表2所示

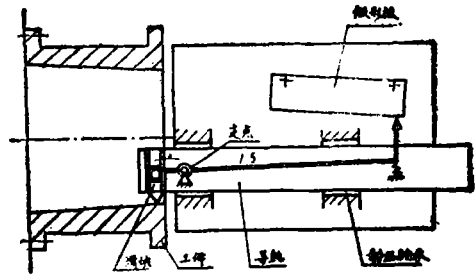


图8 仿形刀架示意图



图9

表 2

单位: 微米

δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
0.3	0.001	± 0.03	1 - 0.5	0.6×10^{-4}	0.17

$$\begin{aligned} \text{总误差: } \delta &= \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2} \\ &= 1.05 \sim 0.6 \mu\text{m} \end{aligned}$$

从仿形刀架的精度分析中可以看出要提高精度首先提高检测镜头锥度的精度, 其次提高仿形样板的加工精度, 再则提高液体静压导轨的精度和刚度。实际镜头加工面形精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$, 这是由于除上述误差外还有一部分加工中的动力因素影响。

3. 机床、工件热变形对加工精度影响

热变形主要是热膨胀和热应力所引起的变形, 它在加工误差中占有较大的比例, 即使对于一个小零件来说, 温度变化几分之一摄氏度也能造成不可接受的误差。有色金属线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 在 100mm 长的铝质件上温度每升高 1°C 工件伸长 $2.36 \mu\text{m}$, 这对加工镜头是个很大的威胁, 加工上述尺寸的镜头走一刀需用一小时四十分钟的时间, 在这个时间内温度的波动将严重影响加工精度。为了控制机床的温升, 将机床的两个油箱从机床床身内抽出与机床隔离, 加工前机床空转二小时以上使机床进入稳定状态, 加工过程中注意局部热源的消除, 随时关闭机床照明灯, 进刀后操作者注意远离机床, 采取零件内部油浴的方法减少镜头的热变形。机床在恒温室内进行工作。

用金刚石刀超精车削出来的非球面镜还需要对零件表面进行最后的研磨、抛光, 进一步提高面形精度和光洁度, 达到 $\lambda/5$ 的面形精度及 2 nm 左右的超光滑表面。

四、结 束 语

用金刚石刀超精车削光学零件需要先进的设备和专门技术。机床的主轴轴承一般采用液体或气体静压轴承, 回转精度要求达到 $0.05 \sim 0.025 \mu\text{m}$ 。工作台导轨一般采用液体和气体静压导轨以及双 V 型滚柱导轨, 导轨的直线度要求达到 $0.1 \sim 0.05 \mu\text{m}/300\text{mm}$, 而且它们都要有足够的刚度和很好的重复精度。此外机床在振动控制、温度控制、伺服性能、定位精度上都要求有较高的水平。加工时金刚石刀具的配制, 工艺参数的选择, 工件无应力装卡, 工具的选择等专门技术都要认真准备和实施。

本文介绍的超精车削非球面镜的加工方法是在引用部分先进技术改装、精化机床上进行的, 可获得圆度为 $0.35 \mu\text{m}$, 面形精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$, 表面光洁度为 ∇_{12} 的高精度非球面镜。然而目前远不能满足高精度光学零件的要求。今后准备采用计算机数控技术完成非球面镜的轮廓加工; 引用空气静压轴承提高主轴回转精度; 开展动态测试、振动控制、热效应等方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 井川直哉; サブミクロン切削の可能性, 不二越技報, 1978, 34No, 1-2.

- [2] 和田 龍児, 超精密加工機械用工作物取付具の問題点, 精密機械, 1982, 48.
- [3] Floy E. Johnson, Michael E. Curcio, David C. Smith and Laurel E. Lockett, Diamond Turning Produces Precise infrared Optics, Laser Focus, 1981, No.7.
- [4] J.B. Bryan, R. Clouser and E. Holland, Spindle Accuracy, American Machinist, 1967, Dec. 4.
- [5] Axes of Rotation ANSI Standard B 89.3.4—1986

Ultraprecision Turning Aspherical Optical Reflectors with Diamond Tools

Wang Xiuwen Zhang Changgui Ma Wensheng

Abstract

This paper describes the way of ultraprecision turning aspherical optical reflectors with diamond tools and analyzes the factors which influence surface finish of mirrors, circularity and figure accuracy. This paper also introduces the influence of machine spindle asynchronous error on surface finish and analyzes the reason for producing asynchronous error motion and the method of reducing asynchronous error value systematically. In order to get rid of the influence of workpiece chucking distortion on machining accuracy of mirror, we used an approaching method from point to point to get rid of workpiece chucking distortion step by step, so that the circularity of mirror achieved were $0.35\mu\text{m}$ in machining.