文章编号:1002-2082(2011)02-0335-08

高次非球面的工艺技术研究

袁吕军[1,2], 陈 韬[1,2,3]

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042; 2. 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:高次非球面在光学系统应用中意义重大,但是一直以来缺乏一套快速、有效的工艺方法。利用 VC6.0 编制了一款面型计算软件以辅助加工,并提出了一种新的高次非球面补偿检验方法。针对一块巡天光谱仪中口径 Φ244 mm 的一面平面另一面为高次非球面的改正镜开展工艺方法的设计与研究,从铣磨成形开始,根据高次非球面的特点提出了几种新型磨削工艺,建立相应的数学模型。由于高次非球面的特殊性,试验了数控铣磨直接成型法,很大程度上降低后继工艺难度,在细磨和抛光阶段采用数控小工具和整工具研磨相结合,能够很好地克服面型不平滑等技术难题。总结出了一套高效率、低成本、高精度的高次非球面工艺方法。

关键词:光学工艺;非球面;高次;补偿检验

中图分类号: TN205; O439 **文献标志码**: A

Manufacturing technology for high order aspheric surface

YUAN Lu-jun[1,2], CHEN Tao[1,2,3]

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 3. Graduate School of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Since high order aspheric surface finds significant applications in optical system, a rapid and effective manufacturing technology is required to meet the demand. Software was developed with VC6.0 for aspheric calculation to help fabrication, and a new compensation test was proposed for high order aspheric surface. Taking a high order aspheric collector with the diameter of 244mm as example, a manufacturing technology was developed and related investigations were conducted. Based on milling process and aspheric surface characteristics, several new grinding methods were proposed and related mathematical models were built. In order to process high order aspheric surface efficiently, computerized numerical control (CNC) milling direct shaping method was tested to reduce the complexity of subsequent processes, and numerical controlled small tool was combined with full aperture craft in polishing process to make aspheric surface smoother. Experimental results demonstrate the high order aspheric manufacturing technology is efficient, low cost and precise.

Key words: optical process; aspheric surface; high order; compensation test

引言

随着现代科技的发展,人们对各类光学系统性能提出了越来越高的要求。非球面的引入对光学系统具有重要意义,特别是高次非球面的应用,在很好地矫正了系统像差的前提下,有效地减少镜面片数,使系统结构得到最大简化,这对于空间

收稿日期:2010-07-09; **修回日期**:2010-08-01

作者简介:袁吕军(1961—),男,江苏泰州人,研究员,主要从事大口径非球面光学工艺与检测的研究工作。
论文联系人:陈韬 E-mail: tchen@niaot.ac.cn

光学系统尤为重要。高次非球面面型参数的多样性更是大大增加了光学设计的自由度,使得设计者面对复杂系统更能得心应手。一些具有国际领先技术的大型望远镜系统中都有高次非球面的身影,比如我国南京天光所研制的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 LAMOST,以及南极施密特望远镜阵 AST3 都用到了多块该类镜面。此外,在一些 X 光透射投影仪、经典施卡系统、高档眼镜片、消球差单透镜等光学系统中,高次非球面也有广阔的应用前景。但是,国内对于高次非球面的工艺研究较少,相比于二次曲面,高次非球面拥有更多参数,面型曲线高低起伏,这对于光学加工提出了更高的要求,往往需要根据具体面型制定不同的工艺路线,使用不同的检验方法。寻求一种准确快速高效的规范化工艺方法成为高次非球面技术发展的关键。总体而言,需要解决如下主要难题:

1) 高次非球面的非球面度往往较二次曲面大,有甚者能达到几十丝。非球面度的大小标识了一块光学镜面的加工难易程度,如果从最适比较球面过度,需要有巨大的磨削量,不仅耗费大量时间,磨削精度的把握也是一个考验。

2) 面型曲率往往变化较大,各带曲率有正有负,相当于凹凸两种面型集中在同一块镜面。限制了磨头和镜面的相对运动以及磨头的大小,镜面容易产生高频误差,而且不易平滑。

3) 多数高次非球面存在一个中性带,即导数为零的点,在面型上表现为最低点。中性带的磨削深度往往会不够,而且容易造成塌边。

4) 需要多块镜片进行补偿,检测系统相对复杂,检测光路的装调比较繁琐。在磨制过程中容易产生高低带差,在阴影图上则反应为许多明暗相间的窄带,增加了面型轮廓判断和测量的难度。

本文有针对性地提出几种磨削理论方法,并建立相应数学模型,很好地克服了高次非球面的常规工艺出现的难点,以一块口径 Φ244 mm、最大非球面近 20 丝的 K9 高次非球面改正镜为工艺试验镜,得到了较为理想的结果,验证了工艺可行性。本文所做的高次非球面工艺技术研究具有广泛的适用性,能很好地指导实际工程应用。

1　高次非球面数学模型

本文主要针对改正镜一类的轴对称高次非球面进行研究,因此用它的子午截线方程即可表示三维面型。用 x 表示轴向的坐标,y 表示径向坐标,设坐标原点在镜面中心处,采用如下的面型表达式:

$$x=ay^2+by^4+cy^6+dy^8+ey^{10}+\cdots \tag{1}$$

改正镜高次非球面多用于平行光路中对光线小幅的修正,故一般偏离平面很小,将轴向坐标表示为径向坐标的幂级数时逼近地很快,能直接求出某一带上的面型高度,在设计时也更加方便。(1)式中二次项系数 $a=1/(2R_0)$,反映了顶点曲率半径的大小。选取的项数越多,拟合的精度越高,但是无谓地增加项数有时会给加工和检验带来更多困惑,应该力求取最少的项数满足要求,本文取最高项为 10 次进行分析研究。

高次非球面面型曲线如图 1 所示,根据多项式参数的不同呈现不同的包络面,二次项系数 a 决定了总体的凹凸情况。图中所示曲线分别以 0, 0.707, 0.866, 1 带作为中性带,中性带导数为零,在平行光路中对光线不发生偏折,一般是面型矢高的最低点,也是加工的难点所在。

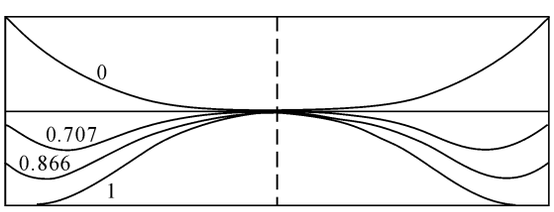


图 1　高次非球面面型示意图

Fig. 1　High order aspheric surface profile

2　数控磨削原理分析以及磨削函数的建立

2.1　Preston 磨削模型

迄今为止,对磨削特性描述最成功的是 1927 年 Preston 建立的材料去除模型。表达式如下:

$$\frac{\mathrm{d}h(x,y,t)}{\mathrm{d}t}=C_p\frac{L}{A}v(x,y,t)=C_pP(x,y,t)v(x,y,t) \tag{2}$$

可以看到磨削过程中材料的去除率与接触面积上工具对工件的压强 $P(x,y,t)$,工具与工件的相对速度 $v(x,y,t)$ 成正比;C_p 称为 Preston 系数,它的大小取决于材料、磨削介质、ph 值以及环境温度等。在特

定的工艺条件下,能够保持系数 C_p 和压强 $P(x,y,t)$ 为恒定值 C 和 P。对去除率 $h(x,y,t)$ 进行积分,归一化后得到单位时间里的去除函数:

$$R(x,y)=\frac{1}{T}CP\int_T v(x,y,t)\mathrm{d}t \tag{3}$$

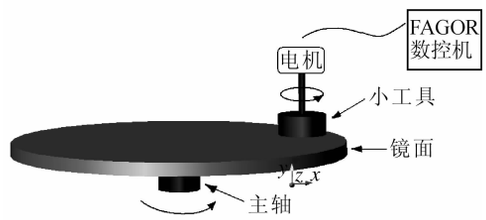
2.2　行星运动小工具磨削原理

小工具是指口径相对明显小于待加工镜面的磨具,在光学工艺中是相对于整工具而言的。在高次非球面的工艺中采用行星运动方式,使工具在平动的同时在电机的带动下作自转动,可以有效地消除镜面的高频误差,在面型精度收敛的同时可以保持平滑。但是又有一个前提,不管在细磨还是抛光阶段,磨削之前必须使工具和待磨带的镜面面型很好地吻合。行星运动的工作原理如图 2(a)所示。

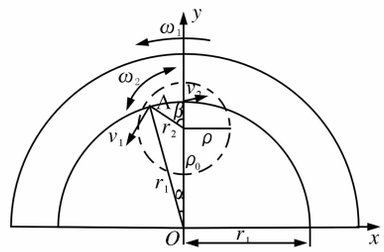
工件绕主轴以角速度 ω_1 转动,工具在电机的带动下以角速度 ω_2 自转,其在镜面上的坐标位置和驻留时间由 FAGOR 8035 CNC 系列数控系统配合松下 MDMA302P1H 伺服马达进行控制。由于本文讨论的高次非球面为轴对称曲面,当工件旋转周期相对于磨削时间是一个极小量时,镜面去除量应该是各项同性的。以镜面中心为原点,r 表示考察点到原点的距离,即径向坐标,用一维坐标 r 代替二维坐标(x,y),问题转化为求解沿镜面径向坐标 r 的一维磨削函数。

2.3　磨削函数的求解

现在分别求解小工具在正反两种转动方式下的磨削函数,首先选取顺时针旋转的圆形工具进行分析。为方便求解,将图 2(a)简化成如图 2(b)



(a) 工作原理图



(b) 磨削模型

图 2　数控小工具行星运动

Fig. 2　The planetary motion of numerical controlled small tool

的模型。其中半圆表示待加工镜面,中心在 O 点,以 ω_1 的角速度绕主轴逆时针旋转;以小圆表示小工具,其半径为 ρ,自转角速度为 ω_2,偏心距 ρ_0 由数控导轨进行控制。镜面上某一带 r_1 在小工具的覆盖下,v_1 和 v_2 分别是该带上一点对于镜面中心和工具中心的相对速度,α 为该点和 y 轴夹角,r_2 为该点到工具中心距离。只要求得 r_1 带上点在不同 α 角下的相对运动速度 $v(\alpha)$,在一个周期内对其积分即可得到小工具的磨削函数 $R(x,y)$。

首先考察小工具顺时针旋转的情况,即工具和镜面转动方向相反。A 点的瞬时相对速度为

$$v=\sqrt{{v_x}^2+{v_y}^2}=\sqrt{(v_1\cos\alpha+v_2\cos\beta)^2+(v_1\sin\alpha+v_2\sin\beta)^2} \tag{4}$$

式中 $v_1=\omega_1 r_1$, $v_2=\omega_2 r_2$,可化解为

$$v=\omega_1\sqrt{{r_1}^2+\frac{{\omega_2}^2}{{\omega_1}^2}{r_2}^2+2\frac{\omega_2}{\omega_1}r_1r_2\cos(\alpha-\beta)} \tag{5}$$

根据几何关系,可得到:

$$\begin{cases} r_2=\sqrt{(r_1\cos\alpha-\rho_0)^2+{r_1}^2} \\ \cos(\alpha-\beta)=\dfrac{{r_1}^2+{r_2}^2-{\rho_0}^2}{2r_1r_2} \end{cases} \tag{6}$$

将(6)式代入(5)式,并设 $e=\frac{\omega_2}{\omega_1}$,$r'=\frac{r_1}{\rho}$,$g=\frac{\rho_0}{\rho}$,化解整理得:

$$v=\omega_1\sqrt{{r_1}^2(e+1)+r_2(e^2+e)-e{\rho_0}^2}=\omega_1\rho\sqrt{r'^2(e+1)^2-2ger'\cos\alpha(e+1)+e^2g^2} \tag{7}$$

材料在单位时间里的去除函数为

$$R(r')=\frac{1}{T}CP\int_T v(r,t)\mathrm{d}t=\frac{\omega_1}{2\pi}CP\rho\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\sqrt{r'^2(e+1)^2-2ger'\cos\alpha(e+1)+e^2g^2}\,\mathrm{d}\alpha \tag{8}$$

式中 α_0 是镜面进入和离开小工具覆盖区域的夹角,其值可由余弦定理确定:

$$\cos\alpha_0=\frac{r_1{}^2+\rho_0{}^2-\rho^2}{2r_1\rho_0}=\frac{r'^2+g^2-1}{2r'g} \tag{9}$$

取 $\omega_1=\omega_2=1\pi/s$,工具半径 $\rho=10$ mm,工具中心在镜面上径向坐标为 $\rho_0=50$ mm,则 $e=1$,$g=5$。通过 MATLAB 模拟得到其磨削特性曲线如图 3(a)所示,小工具中心位置即 $r'=5$ 的位置,磨削峰值和工具中心有一个偏离量,曲线左右呈现明显的不对称性。通过选取不同的 e 和 g 参数组合,发现随着工具自转速度 ω_2 的增大,特性曲线的偏离程度随之增加,其峰值位置总是位于工具中心的外侧。

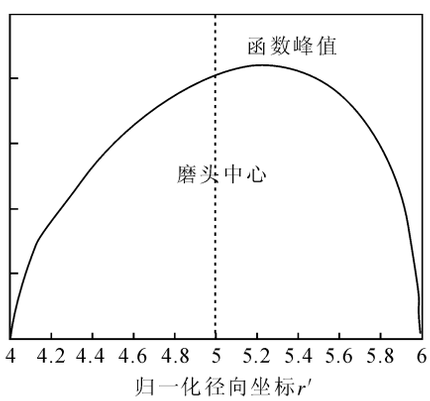
考察工具逆时针旋转的情况,工具和工件转动方向相同。A 点的相对运动速度变为

$$v=\sqrt{v_x{}^2+v_y{}^2}=\sqrt{(v_1\cos\alpha-v_2\cos\beta)^2+(v_1\sin\alpha-v_2\sin\beta)^2} \tag{10}$$

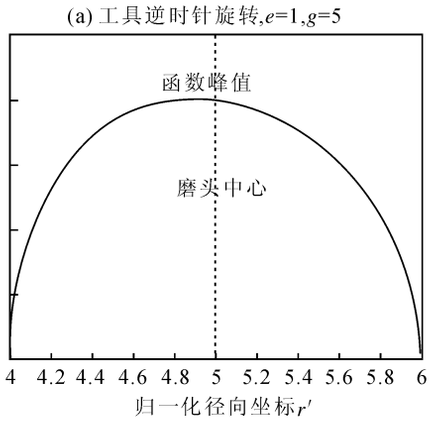
化解得最后的磨削函数为

$$R(r')=\frac{1}{T}CP\int_T v(r,t)\mathrm{d}t=\frac{\omega_1}{2\pi}CP\rho\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0}\sqrt{r'^2(1-e)^2-2ger'\cos\alpha(e-1)+e^2g^2}\,\mathrm{d}\alpha \tag{11}$$

同样取 $e=1$,$g=5$,MATLAB 模拟的磨削特性曲线如图 3(b)所示。通过选取不同的 e 和 g 进行比对,发现这种工具和工件同向旋转的磨削方式能使特性曲线保持较好的对称性,峰值偏离工具中心位置很少,可以根据在磨削带的不同(即 g 的不同),选取合适的速率比(e 的大小)使峰值位置和磨头中心较好吻合。显然这种磨削方式更加方便可靠,在加工实例中控制工具电机使其逆时针旋转。



(a) 工具逆时针旋转,e=1,g=5



(b) 工具顺时针旋转,e=1,g=5

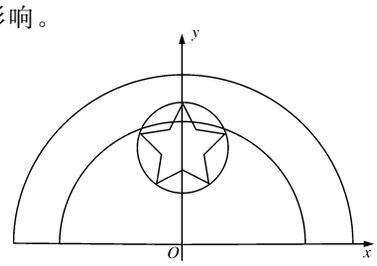
图 3　小工具行星运动磨削特性曲线

Fig. 3　Characteristic operation curve of planetary motion

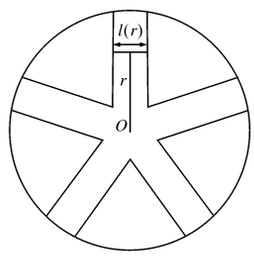
五角星工具磨削函数可以从圆形工具中引出。如图 4(a)所示五角星工具,其内圆半径 $\rho_1=5$ mm,外圆半径 $\rho=10$ mm。其磨削函数为

$$R_{五角}(r')=\begin{cases}R(r'), & 0<|r'-5|<0.5\\ \dfrac{1-|r'-5|}{|r'-5|}*R(r'), & 0.5<|r'-5|<1\end{cases} \tag{12}$$

在五角星内圆覆盖区域内,其磨削特性和圆形工具相同,在内外圆中间部分,其磨削函数需要在圆形工具函数 $R(r')$ 基础上乘上一个衰减因子 $\frac{1-|r'-5|}{|r'-5|}$,故五角星工具峰值更加明显,两端下降较快,在工具 $\frac{2}{3}$ 口径以外几乎没有磨削量。采用五角星工具磨削的针对性更强,能准确、高效地处理大面型误差,去除高带的同时避免了对周围低带的影响。



(a) 五角星工具



(b) 整工具

图 4　磨削工具示意图

Fig. 4　Schematic diagram of polishing tool

2.4　整工具磨削

整工具如图 4(b)所示,口径与镜面尺寸相当,磨削时以工具中心对准工件中心,工具保持静止,镜面自转产生磨削力。由于高次非球面各带曲率的变化大,整工具不能有无动程,磨削特性由工具各带宽度决定。设 r 带处工具宽度为 $l(r)$,在一个周期 T 内,其相对速度为定值 wr,实际磨削时间由工具的占空比决定。

$$R(r)=\frac{1}{T}CP\int_T v(r)\mathrm{d}t=\frac{w}{2\pi}CP*t(r)*$$

$$v(r)=\frac{w}{2\pi}CP(wr)(\frac{5l(r)}{2\pi r})=\frac{5CP\omega^2}{4\pi^2}l(r)\quad(13)$$

可见各带磨削量与其宽度 $l(r)$ 呈正比例关系,保持各带等宽面型则被均匀去除。在粗抛光阶段可以巧妙运用整工具磨削,根据阴影图带差用柏油制作合适的整工具,相比于小工具其磨削速率更快,并能有效地消除镜面像散。

3　检验系统设计

本文以一块望远镜光谱仪系统中的 K9 高次非球面镜为例,设计检验方法并进行加工实践。非球面面型采用(1)式表示,其各项参数如表 1 所示,二次项系数 a 为正说明中心为凸。检验系统参数如表 2 所示,高次非球面镜透射产生的球差通过球面反射镜和弯月透镜的组合进行补偿。系统点列图 RMS=1.036 μm,满足加工要求。

表 1　被检面面型参数表

Table 1　The parameters of the tested surface

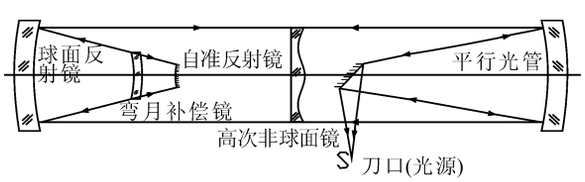
a	b	c	d	e
8.3e−5	−2.832001e−9	−3.014758e−14	1.72707e−18	−7.286909e−23

表 2　检验系统参数

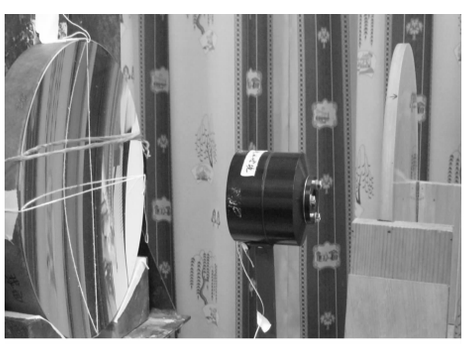
Table 2　The parameters of the test system

表面:类型		曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃	通光半径/mm	非球面系数
物空间	标准	无穷	无穷		0.000000	0
1	偶次非球面	无穷	10.540000	K9	122.000000	$a\sim e$
2	标准	无穷	360.000000		122.013665	0
3	标准	−529.964000	−205.372739	反射镜	122.288449	0
4	标准	88.501000	−6.100000	K9	29.360775	0
5	标准	84.110000	−50.809590		28.387009	0
像空间	标准	无穷			2.890787e−004	0

实际检验光路如图 5 所示,用 4 m 平行光管产生平行光,在汇聚焦点处通过小反射镜形成自准光路,在平行光管的焦点处放置刀口仪进行检验。将弯月镜和自准反射镜安装在一个镜筒内,减少自由度,方便系统的装调。



(a) 检验光路



(b) 检验系统实物图

图 5　实际检验系统

Fig. 5　Actual test system

4　面型计算软件

镜面面型特性和参数对加工者来说至关重要,利用 MATLAB 软件进行计算针对性不强且过程繁琐。利用 VC6.0 开发了一款面型计算软件 CALA 以辅助加工,在加工过程中能够快捷、准确地获取所需数据。其操作界面如图 6 所示,在参数组合框中输入多项式系数和口径参数,即可绘制面型曲线图,还可单独计算各带矢高、曲率、斜率等,给出最适比较球面相关信息。这些参数对于高次非球面加工意义尤其重大。

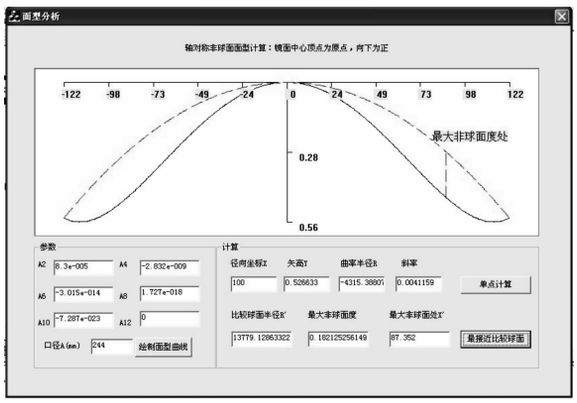


图 6　面型计算软件 CALA

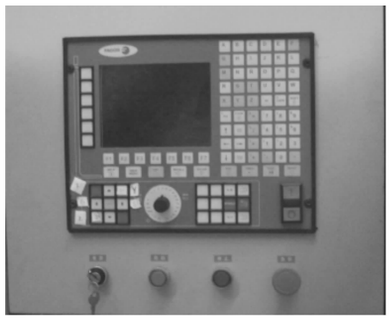
Fig. 6　CALA Software for aspheric calculation

5　口径 244 mm 高次非球面加工工艺

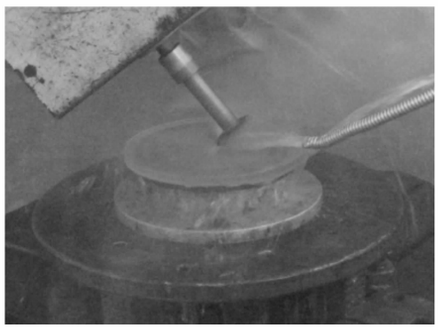
待加工镜面为望远镜光谱仪系统中的红区改正镜,口径 244 mm,一面为平面,另一面为高次非球面,中心厚度 $d=10.54$ mm,材料为 K9。非球面面型参数见表 1。将数据输入到 CALA 软件中,得到面型曲线如图 6 所示,镜面中心凸,边缘凹,曲率变化大,中性带为 $r=113.36$ mm,很接近边缘,该处偏离平面 $x=0.5565$ mm,为最大矢高。最适比较球面经过镜面中心和边缘,其曲率半径 $R=13\ 779$ mm,最大非球面度 $\delta=0.182$ mm,位于 $r=87.35$ mm 处。

5.1　非球面铣磨直接成型

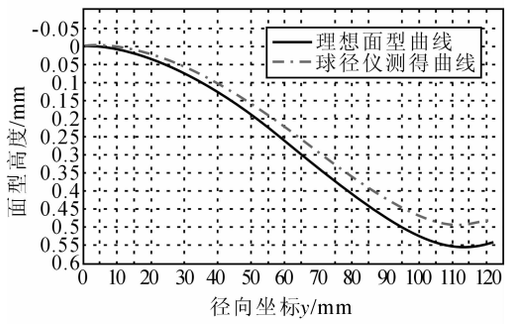
完成了基准平面、外圆、倒角等工艺后,即进入高次非球面的粗磨成型。如果采用二次曲面的加工工艺,粗磨起始球面后转入细磨,那么将近 20 丝的非球面度对于加工者来说是个漫长而艰难的任务。所以对高次非球面的铣磨直接成型技术进行了试验,利用数控铣磨技术直接加工出高次非球面曲线,并检验加工效果。加工实验过程如图 7 所示。



(a) FAGOR 8035



(b) 光学万能铣磨机



(c)面型曲线

图 7　高次非球面铣磨直接成型

Fig. 7　High order aspheric surface milling direct shaping

采用 FAGOR 8035 系列数控仪器配合光学万能铣磨机进行磨制,选用 80 # 金刚石砂轮。从径向坐标和轴向坐标控制砂轮行进路线。砂轮从边缘起磨,按照程序给定的面型曲线行进,到达中心后退回边缘开始下一轮磨削。砂轮每一轮的磨削深度往下降 0.25 mm,循环 6 次,一次性吃刀深度太大不仅影响精度,还容易破坏砂轮和机床。最后一轮下降深度 0.05 mm,并减慢进给速率,以保证成型精度。铣磨后的镜面经导轨球径仪测量,面型曲线如图 7(c)虚线所示,最大偏差降低到 5 丝,而且高次非球面曲线基本成型,大大简化了后续的加工工艺。

5.2　高次非球面细磨和抛光

高次非球面在磨削过程中极易产生中高频误差,面型有较多带差的同时又不平滑,其根本原因是面型曲率变化大,磨削工具不易吻合,而且不可能像加工球面那样采用大动程的整工具抛光。根据前述的数学模型,我们主要采用数控行星运动小工具进行研磨(如图8所示),行星运动中小工具的自转能有效消除高频误差。采用工具旋转方向与镜面相同的方式,以达到较为理想的磨削函数。小工具直接与滑动导轨相连,利用 FAGOR 8035 系列数控系统和松下 MDMA302P1H 伺服马达控制工具沿径向作向一维运动。磨削过程中,通过机械或是光学手段获取面型误差,根据已建立的磨削数学模型计算在各带的驻留时间,形成数据文件输入到 FAGOR 数控仪中控制导轨运动,从而使面型逐步收敛。

特别要注意磨削中必须保持工具面型和镜面较好吻合,否则会对原来面型造成破坏。为此,我们利用 CALA 软件计算各带曲率,同时将镜面根据曲率变化情况分成 3 个区间:0～40,40～90,90～122,可以分别近似认为是凸球面、平面和凹平面,各区间内部的曲率变化不大。为 3 个区间分别配备一个小工具,在首次细磨之前可以借助与各区间曲率相近的标准球面以及砂纸来修改小工具面型。当进入抛光工序,我们还试用了弹性工具抛光工艺,即在刚性铝层和柏油层之间胶一层薄尼龙板,同时将柏油层分离成一块块小柏油块以满足变形需要,由于镜面分区之后各区间曲率变化不大,抛光工具能够被动地与镜面较好吻合。当数控导轨跨区间运动时,需要及时更换相应的工具。

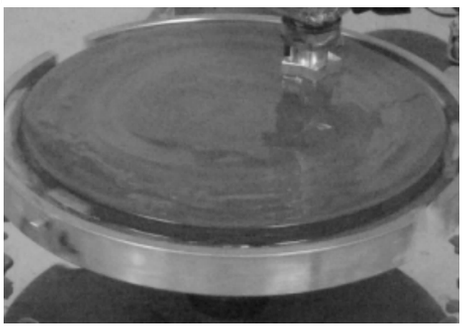


图 8　小工具行星运动加工图

Fig. 8 Diagram of small tool planetary motion

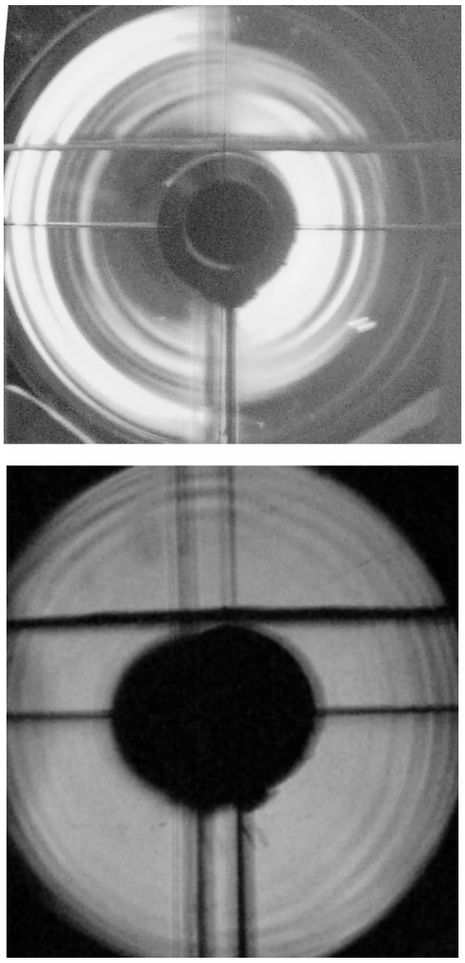


图 9　补偿检验阴影图

Fig. 9　Foucault graph of compensation test

细磨阶段主要是消除铣磨留下的砂眼以及使面型快速收敛。从 280#砂逐步过渡到 303#砂,磨削过程中用导轨球径仪器测量,在面型误差小于 1 μm 时即转入抛光。粗抛光时较多使用整工具柏油盘,磨削时几乎无动程,快速提高镜面光洁度,同时能消除小工具细磨带来的镜面像散,镜面透光后可用光学方法进行检验。用小工具抛光逐步修改中高频误差,随着面型精度逐渐提高,每一轮的磨削时间不断减少,小工具带来的镜面像散应经常用整工具来修改。当系统焦距有问题时,也可将柏油做成三角状用整工具修改,保持面型连续性。后期一些小毛病可以用橘瓣型工具手修,但同样必须注意面型吻合,动程不能太大。图 9 是磨削过程中和最终检验的阴影图,可以看出磨削过程中有较多中高频误差,最终结果则比较理想,补偿检验系统弥散圆小于 0.015 mm,满足了工艺要求。

6 结论

针对高次非球面工艺研究,本文进行了相关研究试验。建立数控小工具磨削的数学模型,开发了一款面型计算软件并提出了一种补偿检验方法。最后给出了一块 Φ244 mm、最大非球面度近20丝的高次非球面加工实例,优化了加工工艺流程,有效地解决了中高频误差难以消除的问题,取得了很好的加工效果。

参考文献:

[1] BINGHAMA R G, WALKERA D D, KIMA D H, et al. A novel automated process for aspheric surfaces[J]. SPIE, 2000, 4093: 445-450.

[2] MALACARA D. Optical shop testing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.

[3] 牟光远,付秀华,苏佳妮,等. 中小口径双非球面数控抛光技术研究[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 818-822.
MU Guang-yuan, FU Xiu-hua, SU Jia-ni, et al. Computer controlled polishing for middle or small double-sided aspheric lens[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 818-822. (in Chinese with an English abstract)

[4] 段存丽,田爱玲,陈志超. 光学非球面器件检测新方法研究[J]. 应用光学, 2004, 25(5): 62-66.
DUAN Cun-li, TIAN Ai-ling, CHEN Zhi-chao. Simulation calculation of measuring optical aspheric surface based on light pattern projection[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 62-66. (in Chinese with an English abstract)

[5] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社, 2004: 72-83.
PAN Jun-hua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 72-83. (in Chinese)

[6] 朱政,高必烈,李新南,等. 主动抛光盘磨制非球面的工艺与面型检测[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 341-343.
ZHU Zheng, GAO Bi-lie, LI Xin-nan, et al. Optical technology and testing method using stressed lap to polish asphere[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 341-343. (in Chinese with an English abstract)