维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号：1002-1582(2007)03-0367-03

光学非球面凹面零件仿形加工方法的修正*

王院生，路桂英，王存洋
（中国地质大学(武汉) 机电工程学院，武汉 430074）

摘 要：从圆锥体靠模仿形法加工非球面光学零件的基本原理出发，指出加工凸非球面时无原理误差，但加工凹非球面时，只能用圆弧包络法加工。用实心圆锥体靠模时，必然存在误差。解决方法是减小工具的曲率半径，或增加一维数控进行补偿，或使用空心圆锥体仿形。实际应用中前两种方法只能减小误差，不能消除。而采用凹模仿形时，则不存在原理误差。

关 键 词：光学零件加工；非球面；凹模仿形法
中图分类号：TH706 **文献标识码**：A

Correction of profiling method to process concave conic aspheric elements

WANG Yuan-sheng, LU Gui-ying, WANG Cun-yang
(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the principle of profiling with a solid cone, there are no theoretic errors to make any convex conic surface on the optic elements. But to the conic surfaces, only arc enveloping mode can be used and theoretic errors are exist inevitably. Solutions such as decreasing the tool's curvature radius, using means of single dimensional numerical control compensation or profiling with a hollow cone are effective. The two in front can reduce the errors but can not eliminate it in practice. Only by profiling with a hollow cone the theoretic errors can be avoided.

Key words: optic elements processing; aspheric elements; convex profiling method

0 引 言

1862年以来人们一直研究非球面的加工，发展了多种加工方法[1—5]。但目前非球面的制造仍然面临制造难度大、成本高、加工效率低等难题[6]。由于它可克服传统加工方法的低效率、高成本等缺点，成为当前的关注点[5—9]。

非球面零件加工一般有运动合成法和仿形法两大类，数控加工属于运动合成法[10]。一般，仿形法的加工效率较高，通常靠模仿形加工适用于精度要求不太高的小口径非球面元件。对应用仿形法加工非球面的超精密磨削的研究也应加强。为此，对提出的圆锥体靠模仿形法进行了研究[11]。由于它使用实心圆锥体靠模，加工凸非球面零件无理论误差[11]；但加工凹面光学零件，则需采取补偿措施。本文对凹面加工时的补偿公式做了理论推导，并提出使用空心圆锥体靠模仿形，从而无须补偿的凹面加工原理。

1 凹面仿形加工问题的提出

二次曲面具有光轴旋转对称性，可用圆锥体靠模仿形加工。加工原理如图1，砂轮主轴和刀口固联，圆锥体主轴倾斜量调整好后，再与工件主轴固联。二者通过消隙机构保持接触。加工时，刀口在圆锥体上靠

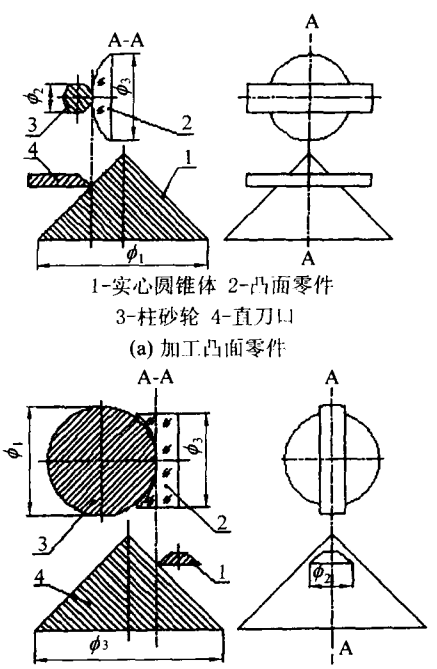


图1 并联仿形法加工原理

* 收稿日期：2006-03-16；收到修改稿日期：2006-07-25 E-mail：wangyshper@sohu.com
作者简介：王院生(1973-)，男，湖北省人，中国地质大学工程师，博士，从事精密测量加工技术研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

模，砂轮在工件上仿形，二者同步联动。同时，圆锥体和工件一起围绕过非球面顶点曲率圆圆心或最接近圆圆心的 Z 轴摆动。可见，圆锥体倾斜角度不同，则可加工不同的二次曲面，它是一种并联式仿形加工系统[10]。相对于 SPDT 等数控加工中小口径非球面元件的方法，无须轨迹插补运算，因而可降低对数控系统的要求。

由图 1(a)可见，加工凸面时，在消隙机构作用下，直刀口是圆锥体的外切线，柱砂轮柱面母线也是凸面工件的外切线，因此加工时无原理误差。

加工凹面时，必须采用圆弧包络法加工。由图 1(b)可见，在消隙机构作用下，圆盘刀口与圆锥体是外切接触，球砂轮与凹面零件是内切接触。因此，圆盘刀口中心点的轨迹是二次曲线的法向外等距线，球砂轮中心点的轨迹是二次曲线的法向内等距线。加工凹球面时，若摆动轴过其顶点曲率圆圆心或最接近圆圆心，则由于它就是球心，因此无原理误差；否则，若摆动轴过其他点，加工凹球面必有原理误差。加工二次非球面时，无论摆动轴过何点，都存在原理误差。

2 凹面仿形加工问题的对策

当使用球砂轮加工凹面二次非球面零件时，要求圆刀口的半径和球砂轮的半径相同(设为 r)，且不大于二次非球面工件顶点的曲率半径 R_0。无论是绕顶点曲率圆中心或最接近圆中心或其他点旋转，当半径 r 为 0 时，加工凹非球面没有原理误差；不为 0 时，必然带来误差；且半径越大，误差越大。实际中 r 不可能为 0，必然存在误差。以凹椭球面加工为例，作圆锥体靠模点和工件加工点的水平截面视图如图 2。

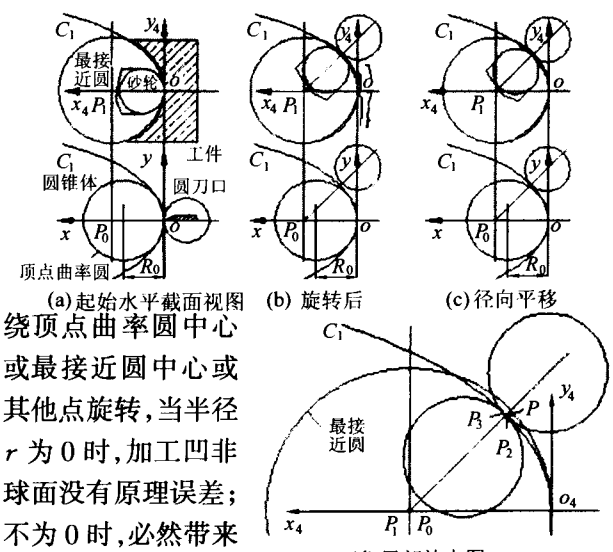


图 2 球砂轮加工凹面的补偿原理

在起始状态，圆盘刀口的靠模点与球砂轮的加工点处于图 2(a)的原点，二者在同一条直线上(在 Z 轴方向对齐)，此时无误差。

由于围绕过最接近圆圆心(或非球面顶点曲率圆圆心)的 Z 轴摆动(设转角 Φ)，圆盘刀口和球砂轮的位置如图 2(b)，此时圆盘刀口与圆锥体脱离接触，而球砂轮与工件也未接触。

在消隙机构的作用下，假设圆盘刀口与圆锥体点接触，此时球砂轮与工件干涉如图 2(c)。图 2(d)是其局部放大图，可见刀口的截取点是 P，砂轮加工的是圆弧段 P_2P_3，它超过椭圆标记的切削范围，因此产生过切(对凹双曲面，则为欠切)，加工非球面时必然带来误差。

此时可增加径向的一维数控进行补偿。补偿时砂轮补偿量 δ 的公式如下：

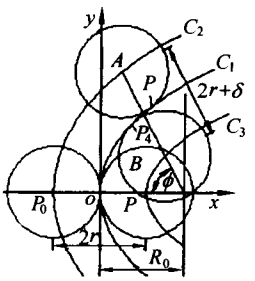


图 3 球砂轮加工凹面的补偿原理

在图 3 中，为便于计算，假定 Z 轴绕非球面顶点曲率圆圆心摆动

理论曲线 C_1

$$y^2 = 2R_0x - (1-e^2)x^2 \tag{1}$$

即

$$F(x,y) = (1-e^2)x^2 + y^2 - 2R_0x = 0$$

C_1 的单位法向量

$$\boldsymbol{n}_0 = \left(\frac{F_x}{\sqrt{F_x^2+F_y^2}}, \frac{F_y}{\sqrt{F_x^2+F_y^2}}\right) \tag{2}$$

其中：$F_x = 2x(1-e^2) - 2R_0$，$F_y = 2y$。

刀口圆心 C_2

$$(X,Y) = (x,y) + r\boldsymbol{n}_0 \tag{3}$$

砂轮球心 C_3

$$(X^*,Y^*) = (x,y) - r\boldsymbol{n}_0 \tag{4}$$

过摆动轴中心的直线 AB 为

$$(x^*,y^*) = (R_0,0) + t(-\cos\Phi,\sin\Phi) \tag{5}$$

其中 Φ 为转角；t 是变参数。

过摆动轴中心的直线 P_0P_C 与 C_2 和 C_3 相交，交点间距 $|P_0P_C| = 2r$；过摆动轴中心的直线 AB 与 C_2 和 C_3 相交，交点间距 $|AB| = 2r + \delta$。δ 与 Φ 之间的关系即为所求。

当 $e=0$，由(1)～(5)可推出

$$\boldsymbol{n}_{00} = \left(\frac{x-R_0}{R_0}, \frac{y}{R_0}\right) \tag{6}$$

$$\begin{pmatrix}X\\Y\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix} + r\begin{bmatrix}x/R_0 - 1\\ y/R_0\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}\dfrac{X+r}{1+r/R_0}\\ \dfrac{Y}{1+r/R_0}\end{bmatrix} \tag{7}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\left(\frac{Y^*}{1+r/R_0}\right)^2=2R_0\left(\frac{X+r}{1+r/R_0}\right)-\left(\frac{X+r}{1+r/R_0}\right)^2 \quad (8)$$

同理有

$$\left(\frac{Y^*}{1-r/R_0}\right)^2=2R_0\left(\frac{X^*-r}{1-r/R_0}\right)-\left(\frac{X^*-r}{1-r/R_0}\right)^2 \quad (9)$$

可见,它们都是圆的方程,圆心均为$(R_0,0)$。

当摆动轴心通过顶点曲率圆心或最接近圆心时,摆动中心就是$(R_0,0)$。于是,无论 Φ 为何值,$|P_0P_c|=2r=|AB|,\delta\equiv 0$,无需补偿。若摆动中心不是$(R_0,0)$,则 $|P_0P_c|=2r,|AB|\neq 2r,\delta\geqslant 0$,需数控补偿。

当 $e\neq 0$ 时,无论摆动轴过何点,都有 $|P_0P_c|=2r,|AB|\neq 2r,\delta$ 不恒为 0,可见加工二次非球面需进行补偿。

直线 AB 与 C_2 相交,有

$$(X,Y)=(x^*,y^*)$$
$$\Rightarrow(x,y)+r\boldsymbol{n}_0=(R_0,0)+t(-\cos\Phi,\sin\Phi)$$
$$t_1=y_1\sin\Phi-(x_1-R_0)\cos\Phi+r\boldsymbol{n}_{01}\cdot\begin{pmatrix}-\cos\Phi\\ \sin\Phi\end{pmatrix} \quad (10)$$

(x_1,y_1)即图 3 中的 P 点。

直线 AB 与 C_3 相交,有

$$(X^*,Y^*)=(x^*,y^*)$$
$$\Rightarrow(x,y)-r\boldsymbol{n}_0=(R_0,0)+t(-\cos\Phi,\sin\Phi)$$
$$t_2=y_2\sin\Phi-(x_2-R_0)\cos\Phi-r\boldsymbol{n}_{02}\cdot\begin{pmatrix}-\cos\Phi\\ \sin\Phi\end{pmatrix} \quad (11)$$

(x_2,y_2)即图 3 中的 P_4 点。

交点组成的线段 AB 为

$$\begin{aligned}(x_\Delta,y_\Delta))&=(t_1-t_2)(-\cos\Phi,\sin\Phi)\\&=\left[(y_1-y_2)\sin\Phi-(x_1-x_2)\cos\Phi+r(\boldsymbol{n}_{01}+\boldsymbol{n}_{02})\cdot\begin{pmatrix}-\cos\Phi\\ \sin\Phi\end{pmatrix}\right]\cdot(-\cos\Phi\quad\sin\Phi)\\&=\{[(x_1-x_2),(y_1-y_2)]+r(\boldsymbol{n}_{01}+\boldsymbol{n}_{02})\}\cdot\begin{pmatrix}\cos^2\Phi & -\sin\Phi\cos\Phi\\ -\sin\Phi\cos\Phi & \sin^2\Phi\end{pmatrix}\end{aligned} \quad (12)$$

根据物理意义,矢量 AB 的内积就是其长度的平方,于是有

$$\delta=\sqrt{\{[(x_1-x_2),(y_1-y_2)]+r(\boldsymbol{n}_{01}+\boldsymbol{n}_{02})\}\begin{pmatrix}\cos^2\Phi & -\sin\Phi\cos\Phi\\ -\sin\Phi\cos\Phi & \sin^2\Phi\end{pmatrix}\{[(x_1-x_2),(y_1-y_2)]+r(\boldsymbol{n}_{01}+\boldsymbol{n}_{02})\}^T}-2r \quad (13)$$

其中 T 表示矩阵的转置。上式即为一维数控补偿的表达式。实际应用中需用数值方法求解,因此差补运算带来的误差不可避免。

3　计算实例

取 $R_0=200$mm,$r=30$mm,取 Φ 的步长为 0.01°,取 x 的步长为 0.01mm,分别对 $e=0.1\mu$m,0.5μm,0.9μm 的三个椭球面进行计算。以误差值为 1×10^{-5}为搜索停止的判别条件,经 MATLAB 计算,得到几个典型值如表 1 所示。

表 1　计算结果(δ 的单位为 μm)

δ	$e=0$	$e=0.1$	$e=0.3$	$e=0.5$	$e=0.9$
$\Phi=0°$	0	0	0	0	0
$\Phi=10°$	0.0359	0.0359	-0.0626	4.0	0.1344
$\Phi=30°$	-0.0210	0.0656	1.0	8.1	68.2
$\Phi=50°$	-0.0231	0.2710	17.3	-1148.0*	849.3
$\Phi=70°$	0.03723	1.1	85.8	561.4	3674.8

δ 与 Φ 之间的变化与 e 有关,大体趋势如图 4。

可见,当应用波长在 1.0μm 内时,摆动轴的转角 Φ 应该在 ±10°范围左右,才能在理论上保证加工任意光学二次曲面的面形精度在 10 道光圈内,此时才具有实用价值。同时可见 Φ 角较大时数值计算带来的误差不容忽视(如表 1 中带 * 者)。

4　凹面仿形加工原理的提出

如果将圆锥体做成壳状,刀口外切改为内切,球砂轮与圆刀口的半径相等,且不大于 R_0。无论摆动轴是绕顶点曲率圆中心或最接近圆中心或其它点旋转,此时都可保证圆刀口中心的轨迹和球砂轮中心的轨迹是二次曲线的法向内等距线,截取的轨迹和加工的轨迹都是同一条二次曲线,理论上可得到理想凹非球面和凹球面。

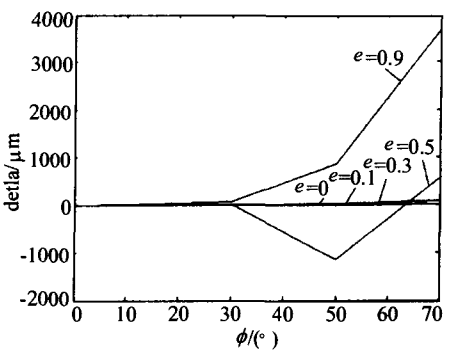


图 4　δ 与 Φ 之间的变化趋势

5　结　论

用实心圆锥体靠模仿形法加工凹非球面时,理论上必然带来误差,为减小误差而使用小直径工具,则切削线速度低,效率不高。而且加工口径有限,摆动轴的转角通常应该在 ±10°范围内,此时在理论上才具有实用价值。采用一维数控补偿时,已转化为

(下转第 372 页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

2217.6mm，把 d 和 R 带入(8)式便求出波长 λ 对应的出射狭缝的位置(以英尺为单位)。具体步骤如下：利用He空心阴极光源发射的已知谱线 30.3780 nm、53.7030nm、58.4334 nm，根据(8)式分别计算出三个波长对应的 r_b 理论值为436.75 mm、569.80 mm、592.94 mm，仔细调整出射狭缝使其移到大约436.75mm处，再找到光最强时出射狭缝的位置，把扫描波长读数改为17.195英尺，再测量三次30.3780nm的光谱分布来验证其校正情况，把此位置作为参考位置。为了验证单色仪整个工作波段的波长标定情况，再分别测量三次53.7030 nm、58.4334 nm的光谱分布。光源电压为1500V、电流400mA，系统的真空度大约 4.9999×10^{-2}Pa。图4、图5、图6分别是用校准后的单色仪测量三次的He在30.3780nm、53.7030nm、58.4334nm处的光谱分布，图7是单色仪波长—出射狭缝位置标定曲线。

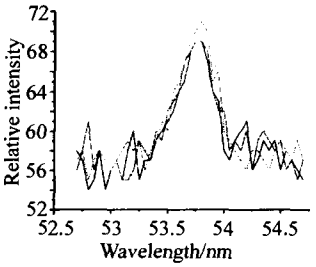


图5 He 53.8nm光谱分布

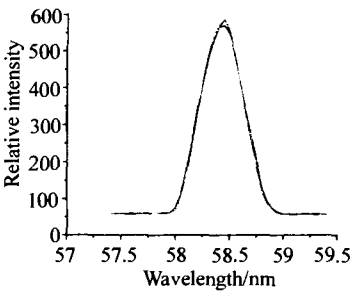


图6 He 58.45nm光谱分布

通过origin软件找到平均测量的峰值分别为30.4nm，53.8nm，584.5nm，图7显示了单色仪的波长—出射狭缝位置关系的标定曲线。该误差来源于二个方面：单色仪本身的系统误差和光电倍增管的误差；由单色仪波长扫描公式和扫描读数的位数可看出，出射狭缝移动的最小距离是0.05mm，波长变化0.01nm，而NIST给出的数据精确到0.0001nm；另外，光电倍增管的不稳定也会带来一定的误差。由标定结果可见，在此波段内单色仪标定精度为±0.017nm～±0.097nm。

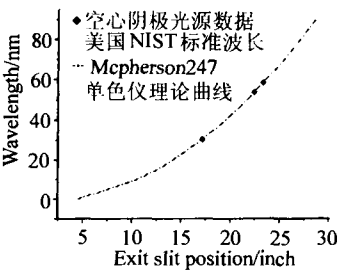


图7 单色仪出射狭缝位置—波长关系曲线

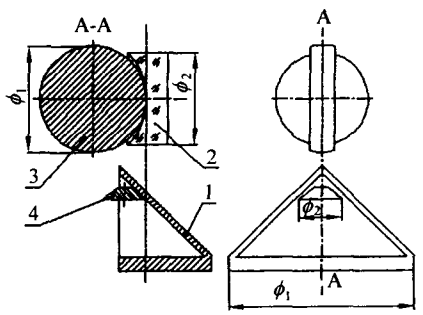
参考文献：

[1] Kirz J, Rarback H. Soft x-ray microscopes[J]. Rev. Sci. Instrum, 1985,56:1—13.
[2] Howells M, Kirz J,. Sayre D, et al. Softx-raymicroscopes[J]. Phys. Today, 1985,8:22—32.
[3] Sansonetti J E, Martin W C, Young S L. Handbook of basic atomic spectroscopic data(version1. 1)[DB/OL]. http: // physics. nist. gov/Handbook[Access Date: Oct., 8, 2004]. National Institute of Stan dards an d Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
[4] 巩岩. 无污染激光等离子体软X射线源光谱测试方法研究[D]. 长春：中科院长春光机所，1998.
[5] Namika T J. Theory of the concave Grating. I[J]. Opt Soc Am. Res, 1959,49:446—460.
[6] 曹继红，尼启良，陈波. 用Si光电二极管标定软X射线探测器[J]. 光学精密工程，2004,12(1):118—121.
[7] 尼启良，齐立红，陈波. 使用气体靶激光等离子体光源的软X射线反射率计[J]. 光学精密工程，2004,12(6):576—580.

(上接第369页)

数控加工，插补运算带来的误差难免。

若将实心圆锥体改为空心圆锥体，用凹模取代凸模，则加工凹非球面时，无论摆动轴的轴心在不在顶点曲率圆圆心或最接近圆圆心，只须圆盘刀口的半径和砂轮的半径相等，则不存在理论误差，可保持加工效率高的特点。



1-空心圆锥体；2-凹面零件；3-球砂轮；4圆盘刀口

图5 球砂轮加工凹面的仿形原理

参考文献：

[1] 庄司克雄. 超精密加工と非球面加工[M]. 东京：株式会社エヌ・ティー・エス，2004.330—377.
[2] Lee W B, Gao D, Cheng C F, et al. Computer-integrated optics design and tool path generation in virtual maching of aspheric surfaces [J]. Proc. Instn. Engrs. J. Engeering Manufacture, 2003. 217 (B9): 1285—1294.
[3] Dávila A C. Edge effects with the preston equation for a circular tool and workpiece[J]. Applied Optics, 2004. 43(6): 1250—1254.
[4]. 庞长涛，罗松保. 非球面加工先进技术[J]. 航空精密制造技术，2001,37(3):1—5.
[5] 铃木浩文. マィクロ非球面型の超精密微细研磨加工[J]. 机械技术，2004,25(1):31—34.
[6] 杨小王番，郭隐彪，林飞龙. 超精密非球面磨削实验系统建模及实验[J]. 机床与液压，2005,10:17—20.
[7]. 王贵林，李圣怡，戴一帆. 光学非球面复合加工机床的设计与精度分析[J]. 中国机械工程，2004,15(2):99—102.
[8]. 张向阳. DHM-500超精密数控非球面透镜磨床的研制[J]. 纳米技术与精密工程，2004,2(1):54—58.
[9]. 韩成顺，董申，唐余勇. 大型光学非球面超精密磨削的几何模型研究[J]. 兵工学报，2004,25(6):741—745.
[10]. 王红岩，郭培全，迟清，等. 非圆等距廓形的仿形加工法研究[J]. 机床与液压，2005,12:42—45.
[11]. 王院生，朴承镐，路桂英. 轨迹成形法非球面光学零件加工装置的模型[J]. 机械科学与技术. 2005,24(8):910—913.