

非球面反射镜的弹性变形加工

王建国 潘君骅

(中国科学院南京天文仪器厂)

提 要

本文研究了利用弹性变形加工离轴抛物面的方法,并给出了一个特定的离轴抛物面的实验结果。镜面最大误差 $<1/4\lambda$, 均方根误差为 0.067λ , $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ 。

一、引 言

离轴抛物面传统上是从整体抛光好的大抛物面上切割下来的方法加工,这是一种很不经济的方法,对于离轴抛物距远的、本身口径较大的加工件又非常困难。利用计算机控制的方法虽然可行^[1],但需要高精度和自动控制的设备。

对于理想的各向同性、完全弹性材料,形变与外力有一定函数关系。可以把本来难以加工的非球面和其它非球面通过弹性变形而使其成为球面来加工。

施密特(Schmidt)在1930年首先用弹性变形法加工了轴对称的施密特改正板。J. Lubliner等人首先进行了口径为360mm的离轴抛物面的变形法抛光实验,取得了好的结果^[2]。美国基特峰天文台正在进行2m口径的离轴抛物面的弹性变形加工实验^[3]。

光学非球面偏离球面的程度都是不大的。在小变形条件下玻璃材料符合各向同性及完全弹性这两个基本假设,并且符合变形与载荷的独立与叠加原理。抛光工具引起的变形与施加的外力引起的变形是相互独立的,检验时抛光工具取下后镜面的变形就是施加的外力所引起的变形。

二、变形挠度、外力与变形的关系

非球面与球面之差即加力后所需的变形挠度可以写成极坐标下的三角级数形式

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} [(A_{nn}\rho^n + A_{n+2,n}\rho^{n+2})\cos n\theta + (B_{nn}\rho^n + B_{n+2,n}\rho^{n+2})\sin n\theta] + A_{40}\rho^4. \quad (1)$$

由上式表示的板的挠度可以通过如图1所示的在板的边缘加弯矩 $M(\rho, \theta)$ 和剪力 $V(\rho, \theta)$ 及背面施加均布载荷 q 来实现,

$$q = (64D/a^4)A_{40}.$$

弯矩和剪力的分布函数可用傅氏级数表示:

$$\left. \begin{aligned} M(\theta) &= M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (M_n \cos n\theta + \bar{M}_n \sin n\theta), \\ V(\theta) &= V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (V_n \cos n\theta + \bar{V}_n \sin n\theta), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

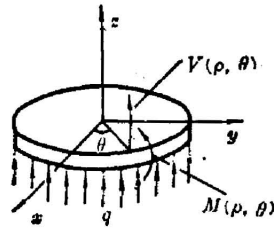


图 1

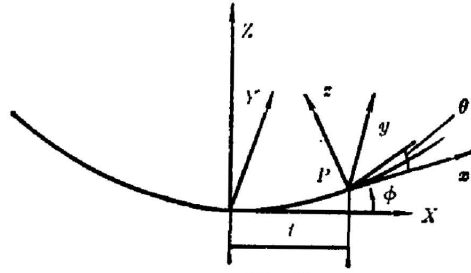


图 2

其中

$$\left. \begin{aligned}
 M_0 &= q_0 a^2 \left[\frac{3+v}{16} + \frac{3-v}{80} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] + \frac{2D}{a^2} (1+v) \left[A_{20} + 2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 A_{40} \right] + 4(3+v) A_{40}, \\
 M_1 &= \frac{2D}{a^2} (3+v) A_{31}, \\
 M_2 &= \frac{D}{a^2} \left\{ 2(1-v) A_{22} + 12 \left[1 + \frac{1}{5} (2-v) \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] A_{42} \right\}, \\
 M_3 &= \frac{D}{a^2} 6(1-v) A_{33}, \\
 V_0 &= -\frac{D}{a^3} 32 A_{40}, \\
 V_1 &= -\frac{D}{a^3} 2(3+v) A_{31}, \\
 V_2 &= \frac{D}{a^3} \left\{ 4(1-v) A_{22} + 12 \left[\frac{2}{5} (2-v) \left(\frac{h}{a} \right)^2 - (1+v) \right] A_{42} \right\}, \\
 V_3 &= \frac{D}{a^3} [18(1-v) A_{33}],
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

用(1)式中的 B_{mn} 代替(3)式中的 A_{mn} 就得到 \bar{M}_n 和 \bar{V}_n 。其余系数可忽略不计。式中 a 是镜面半口径, h 是镜子厚度, $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 称为板的抗弯刚度, E 是材料的弹性模量, ν 是材料的泊松比。对于二次非球面 A_{mn} 、 B_{mn} , 由顶点曲率半径 R_0 , 离心率 e , 离轴距 t , 镜面口径 $2a$ 和比较球面半径 R 确定, 对于如图 2 所示的抛物面离轴部分挠度系数为 ($\varepsilon = t/R$)^[4]:

$$A_{20} = \frac{a^3}{2R_0} \left(\frac{R_0}{R} - 1 + \varepsilon^2 + \frac{9}{8} \varepsilon^4 + \frac{5}{4} \varepsilon^6 + \dots \right),$$

$$A_{22} = \frac{a^3}{4R_0} \varepsilon^2 \left(1 - \frac{3}{2} \varepsilon^2 + \frac{15}{8} \varepsilon^4 + \dots \right),$$

$$A_{31} = \frac{a^3}{2R_0^2} \varepsilon \left(1 - \frac{11}{4} \varepsilon^2 + \frac{21}{4} \varepsilon^4 + \dots \right),$$

$$A_{33} = -\frac{a^3}{8R_0^2} \varepsilon^3 (1 - 3\varepsilon^2 + 6\varepsilon^4 + \dots),$$

$$A_{40} = \frac{a^4}{8R_0^3} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 3\varepsilon^2 (1 - 4\varepsilon^2 + \dots) \right],$$

$$A_{42} = -\frac{a^4}{2R_0^3} \varepsilon^2 (1 - 5\varepsilon^2 + \dots), \quad B_{mn} = 0.$$

三、实 验

实验镜的参数为 $R_0=4870\text{ mm}$, $t=160\text{ mm}$, $h=30\text{ mm}$, $a=110\text{ mm}$, K_0 玻璃 $E=7480\text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.23$ 。设计了一个用杠杆和弹簧对镜子进行加力的专用工具。图 3 是夹具的示意图。在现有的 60cm 磨镜机上进行抛光。实际中要获得随 θ 连续变化的外力是不可能的。只能用分段外力来近似连续外力, 方法是在镜盘的边缘等分粘上几个杠杆, 第 i 个杠杆上所用的外力是由 (2) 式在该杆的圆心角 θ_i 内积分获得,

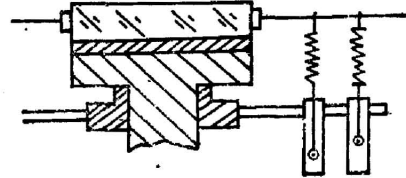


图 3

$$M_i = \int_{\theta_i} aM(\theta)d(\theta), \quad V_i = \int_{\theta_i} aV(\theta)d\theta。$$

实验采用了 24 个杠杆, 杠杆的结构是将一块与比较板外圆有同一曲率的中间玻璃块粘在镜子边缘, 再把杠杆粘在玻璃上。中间块的作用是使金属和玻璃因膨胀系数不同而引起的应力不影响镜面的变形。用环氧树脂粘接。中间块厚度为 10mm, 粘接面积 $22 \times 22\text{ mm}^2$, 杠杆长 60mm。杠杆上用两个加力点 F_1 和 F_2 实现 $M(i)$ 和 $V(i)$ 。 F_1 和 F_2 用一个拉簧和一个压簧产生, 弹簧在加重量为 F 的法码后产生伸长或压缩变形, 将变形固定下来后去掉法码仍能保持外加的力 F 。在以后的加工中, 这个力始终保持不变。

粘接后用阴影图看不到局部变形, 即无粘结应力。第一次计算的 M 和 V 列于表 1。最后一次加力时最大拉力为 12 公斤, 最大压力为 8.5 公斤。镜子背面的压力 q 是将镜子放在一个真空橡皮垫上再放在刚性底座上获得的。

实验的流程如图 4。首先计算最小应力比较球面半径 $R=4880\text{ mm}$ 。先抛光了曲率半径为 4880mm 的凹球面, 然后加工一块同样曲率半径的凸球面作为样板。对凹球面加力使其变形成为与所要求的离轴抛物面相反的负非球面。它与比较球面的波差和比较球面与所要求的离轴抛物面的波差大小相等, 符号相反。用凸球面样板检验时, 一个是高光圈, 另一个就是低光圈, 但干涉图是一样的。先将未加力时样板检验的干涉图进行定量检验^[5], 求得 W_0 的系数。根据文献[4]计算的理论变形 $W_{理}$ 再计算 M_I 和 V_I , 进行第一次加力。然后计

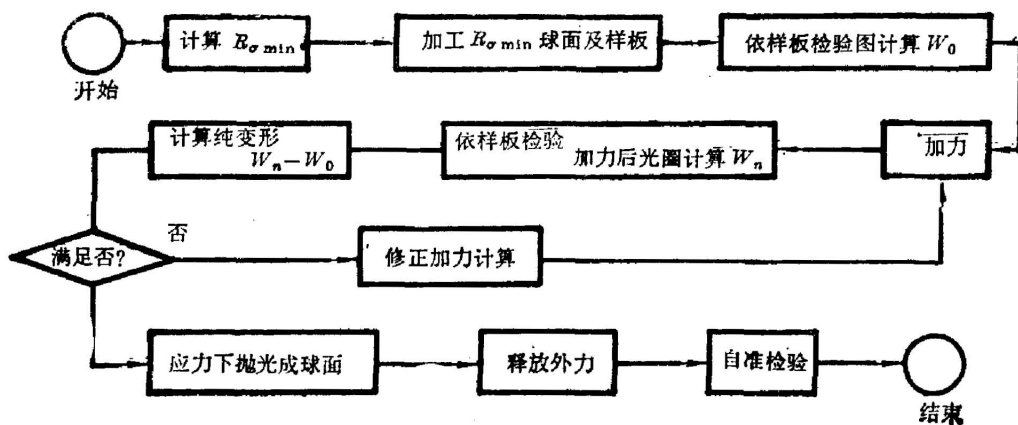


图 4

表 1

加力次数 杠杆顺序	1		2		3	
	V	M	V	M	V	M
0°	-3.286	256.4	-5.849	304.8	-3.686	248.2
15°	-3.314	242.2	-3.81	300.5	-3.323	263.6
30°	-3.373	201.7	-3.072	251.4	-3.584	240.6
45°	-3.403	140.7	-4.007	162.8	-4.277	187.3
60°	-3.324	67.7	-5.003	76.0	-4.891	122.1
75°	-3.064	- 8.1	-4.416	22.7	-4.977	62.0
90°	-2.583	-78.4	-2.531	- 12.2	-4.423	13.8
105°	-1.892	-137.3	0.873	- 67.5	-3.439	-26.6
120°	-1.059	-181.8	-0.050	-151.9	-2.331	-67.1
135°	-0.198	-212.1	0.762	-232.9	-1.410	-112.8
150°	0.554	-230.3	2.120	-280.0	-0.469	-163.3
165°	1.068	-239.5	3.114	-300.3	0.125	-214.8
180°	1.251	-242.3	2.538	-318.1	0.374	-261.6
195°	1.068	-239.5	0.732	-333.1	0.237	-296.2
210°	0.554	-230.3	-0.685	-320.0	-0.172	-309.2
225°	-0.198	-212.1	-0.899	-268.1	-0.630	-292.5
240°	-1.059	-181.8	-0.868	-198.8	-0.979	-244.9
255°	-1.892	-137.3	-1.853	-135.9	-1.291	-175.3
270°	-2.583	-78.4	-3.701	-73.4	-1.808	-99.4
285°	-3.064	-8.1	-5.254	10.3	-2.688	-30.4
300°	-3.324	67.7	-6.055	112.9	-3.773	28.1
315°	-3.403	140.7	-6.695	203.5	-4.624	83.5
330°	-3.373	201.7	-7.421	259.0	-4.833	142.4
345°	-3.314	242.2	-7.368	287.7	-4.379	202.1

注: 剪力单位 kg, 弯矩单位 kg·mm。

表 2

M	n	Zernike 多项式 $Z(\rho, \theta)$	Zernike 多项式系数 C_{mn} 与三角级数系数的关系	计算 rms 时的 权重 $\frac{1}{r_{mn}}$	理论挠 度系数 $C_{mn}(\frac{\lambda}{2})$	理论值与加力后的系数 之差(样板检验) $C_{mn}(\frac{\lambda}{2})$			自准检验 结 果
						第一次 加力	第二次 加力	第三次 加力	
0	0	1	$C_{00}=A_{00}+A_{20/2}+A_{40/3}+\dots$	1	-1.864	单位: $\frac{\lambda}{2}$ $\lambda=0.5893\mu$			$\lambda=0.6328\mu$
1	-1	$\rho \sin \theta$	$C_{1-1}=B_{11}+\frac{2}{3}B_{31}+\frac{1}{2}B_{51}+\dots$	$\frac{1}{4}$	0.000				
1	1	$\rho \cos \theta$	$C_{11}=A_{11}+\frac{2}{3}A_{31}+\frac{1}{2}A_{51}+\dots$	$\frac{1}{4}$	2.081				
2	-2	$\rho^2 \sin 2\theta$	$C_{2-2}=B_{22}+\frac{3}{4}B_{42}+\frac{3}{5}B_{62}+\dots$	$\frac{1}{6}$	0.000	0.182	2.857	0.002	-0.095
2	0	$2\rho^2-1$	$C_{20}=\frac{1}{2}A_{20}+\frac{1}{2}A_{40}+\frac{9}{20}A_{60}+\dots$	$\frac{1}{3}$	-1.775	0.403	-0.054	-0.359	0.192
2	2	$\rho^2 \cos 2\theta$	$C_{22}=A_{22}+\frac{3}{4}A_{42}+\frac{3}{5}A_{62}+\dots$	$\frac{1}{6}$	2.271	0.468	-0.456	-0.633	0.104
3	-3	$\rho^3 \sin 3\theta$	$C_{3-3}=B_{33}+\frac{4}{5}B_{53}+\dots$	$\frac{1}{8}$	0.000	-0.056	0.351	0.230	-0.081
3	-1	$(3\rho^3-2\rho)\sin \theta$	$C_{3-1}=\frac{1}{3}B_{31}+\frac{2}{5}B_{51}+\dots$	$\frac{1}{8}$	0.000	0.492	-0.024	0.234	-0.144
3	1	$(3\rho^3-2\rho)\cos \theta$	$C_{31}=\frac{1}{3}A_{31}+\frac{2}{5}A_{51}+\dots$	$\frac{1}{8}$	1.040	-0.766	-0.010	0.075	-0.268
3	3	$\rho^3 \cos 3\theta$	$C_{33}=A_{33}+\frac{4}{5}A_{53}+\dots$	$\frac{1}{8}$	-0.001	0.195	-0.179	0.154	0.009
4	-4	$\rho^4 \sin 4\theta$	$C_{4-4}=B_{44}+\frac{5}{6}B_{64}+\dots$	$\frac{1}{10}$	0.000	-0.114	0.128	0.052	0.173
4	-2	$(4\rho^4-3\rho^2)\sin 2\theta$	$C_{4-2}=\frac{1}{4}B_{42}+\frac{1}{3}B_{62}+\dots$	$\frac{1}{10}$	0.000	0.063	0.003	-0.030	0.392
4	0	$6\rho^4-6\rho^2+1$	$C_{40}=\frac{1}{6}A_{40}+\frac{1}{4}A_{60}+\dots$	$\frac{1}{5}$	0.089	-0.061	0.003	0.038	0.117
4	2	$(4\rho^4-3\rho^2)\cos 2\theta$	$C_{42}=\frac{1}{4}A_{42}+\frac{1}{5}A_{62}+\dots$	$\frac{1}{10}$	0	0.111	0.067	-0.026	0.290
4	4	$\rho^4 \cos 4\theta$	$C_{44}=A_{44}+\frac{5}{6}A_{64}+\dots$	$\frac{1}{10}$	0	0.050	0.074	0.038	0.190
5	-5	$\rho^5 \sin 5\theta$	$C_{5-5}=B_{55}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	-0.030	0.051	0.066	0.83
5	-3	$(5\rho^5-4\rho^3)\sin 3\theta$	$C_{5-3}=\frac{1}{5}B_{53}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	-0.021	-0.057	-0.025	0.50
5	-1	$(10\rho^5-12\rho^3+3\rho)\sin \theta$	$C_{5-1}=\frac{1}{10}B_{51}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	0.135	-0.040	-0.021	0.195
5	1	$(10\rho^5-12\rho^3+3\rho)\cos \theta$	$C_{51}=\frac{1}{10}A_{51}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	-0.098	0.064	0.021	0.100
5	3	$(5\rho^5-4\rho^3)\cos 3\theta$	$C_{53}=\frac{1}{5}A_{53}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	-0.002	-0.024	0.002	-0.059
5	5	$\rho^5 \cos 5\theta$	$C_{55}=A_{55}+\dots$	$\frac{1}{12}$	0	0.082	0.081	-0.061	0.085
均方根误差(rms)						0.230 λ 0.136 μ	0.603 λ 0.356 μ	0.181 λ 0.107 μ	0.134 λ 0.085 μ

算第一次加力后拍得的干涉图得出 W_1 。用 $W_1 - W_0$ 就是第一次加力引起的实际变形 W_I 。第一次加力变形误差为 $W_2 = W_{理} - W_I$ 。依 W_2 计算 M_2 和 V_2 后加上 M_I 、 V_I 作为第二次应加的力, $M_{II} = M_I + M_2$, $V_{II} = V_I + V_2$ 。计算第二次加力后实际变形与理论变形的误差是否满足要求。不满足要求则重复上述步骤继续加力过程。满足要求则在加力状态下把凹面镜重新抛光成球面后释放外力就得到所要求的离轴抛物面。最后进行自准检验。

实验中这个过程进行了三次。第二次修正加力计算时原想把高阶的误差 ($\geq \rho^4$) 也计算进去加以修正。结果所需加的外力与第一次计算得到的外力相差很大, 而实际加力后的面形反而比希望得到的面形相差更远。这说明镜子对高阶变形有较大的抗力, 想得到高阶变形必须加很大的外力, 而所加的外力对低阶项有很大影响, 低阶项是误差中的主要项。第三次加力就只取到四次 ($\leq \rho^4$) 项的系数作为要修正的最高次变形得到了最后结果。三次所加的力见表 1。各次检验结果列于表 2。

自准检验光路示于图 5。干涉图(图 6)是用南京天文仪器厂的激光球面干涉仪拍的。理论参数为 $f = 2435 \text{ mm}$, $t = 160 \text{ mm}$ 。实测值为 $f = 2436.5 \pm 1 \text{ mm}$, $t = 161 \pm 2 \text{ mm}$ 。自准检验中因为光线在镜面上反射了二次, 干涉图反映的误差是实际镜面误差的 2 倍。由图 6 可见最大波差误差为一个圈, 即 $1/4$ 个波长。均方根误差为 $1/15$ 个波长, 探测光的波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 。

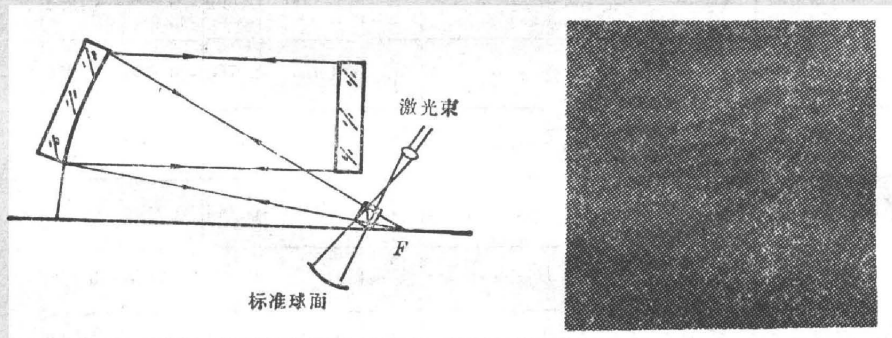


图 5

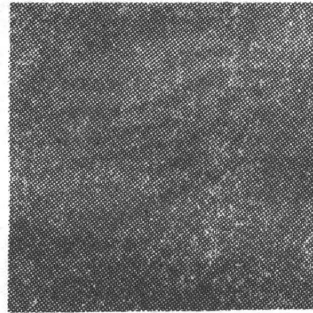


图 6

南京天文仪器厂李德培同志在实验和照相中给予了许多帮助, 长春光学精密机械研究所余景池同志提供了干涉图计算程序。天文仪器厂光学车间曹建屏同志抛光了应力状态下的实验镜, 光学车间同志在实验中给予了大力支持。计算机房的同志为上台计算提供了许多方便, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. A. Jones; *Opt. Eng.*, 1983, **22**, No. 2 (Mar), 236.
- [2] J. Lubliner, J. E. Nelson; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (Jun), 2431.
- [3] L. Golden et al.; *SPIE Proc.*, 1982, 332 (Mar), 357.
- [4] J. E. Nelson; *Appl. Opt.*, 1982, **19**, No. 14 (Jul), 2332.
- [5] 余景池; 《光学学报》, 1984, **4**, No. 9 (Sec), 814.

Stressed mirror fabrication—a new technology for making off-axis section of a paraboloid

WANG JIANGUO AND PAN JUNHUA

(*Nanjing Astronomical Instruments Factory*)

(Received 21 March 1985; revised 10 June 1985)

Abstract

We have used a method for making off-axis paraboloidal mirrors by means of elastic deformation. The principle is that after applying an appropriate set of forces to a mirror blank, the polishing process can remove the forces and make the surface deform elastically into the desired off-axis paraboloid.

We have made calculations of the stress and deformation for an off-axis section of a paraboloid and have designed the special jig for applying the force with bars and springs.

The experimental results are satisfactory, with a maximum surface deviation from the desired surface of $1/4\lambda$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) and a rms error of $1/15\lambda$.