

文章编号: 0253-2239(2006)06-0831-5

反射镜补偿检验

郝沛明 付联效 袁立银 李韦韦

(同济大学物理系非球面光学实验室, 上海 200433)

摘要: 在光学加工中,反射镜可以很好地补偿待检镜,解决加工中的一些难题。通过三级像差理论求解反射镜补偿检验二次曲面的初始结构参量,令球差系数 $\sum S_1 = 0$,补偿镜 e_1^2 可选择球面或椭球面,推导出补偿镜和待检镜之间关系的表示式。 $e_1^2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$,按公式画出 $e_2^2/\alpha \sim \beta, \alpha r_{02}/r_{01} \sim \beta$ 的曲线图,从中确定 $\beta \propto \alpha, e_1^2, e_2^2, r_{01}, r_{02}, d_{12}$ 的对应关系,解出补偿检验的初始结构参量,分析补偿镜放置待检镜曲率中心前 $\alpha > 0, \alpha > 1$ 和后 $\alpha < 0, \beta \geq 0, \beta \leq 0$ 对应待检镜的 e_2^2 各种求解。分析看出:这包括了补偿检验的全部功能,对凸和凹的二次曲面都可以进行补偿检验,其中有以前提出的解,也有以前没有发现的解,对补偿检验的全面分析是非常有益的。

关键词: 成像系统; 补偿检验; 三级像差理论; 二次曲面
中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Compensating test of the Reflective Mirror

Hao Peiming Fu Lianxiao Yuan Liyin Li Weiwei

(Laboratory of Aspheric Optics, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200433)

Abstract: The mirror can compensate the tested mirror very well in the optical manufacturing, which with some difficult problems can be solved in the manufacturing. Based on the third-order aberration theory the initial configuration parameters of the mirror compensator in testing the conicoid are solved in theory, making spherical aberration coefficient $\sum S_1 = 0$, and the relations between the compensating mirror and the tested mirror are given, with the surface of compensator chosen as sphere or ellipsoid. Setting $e_1^2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$, the graph of $e_2^2/\alpha \sim \beta, \alpha r_{01}/r_{02} \sim \beta$ is plotted based on the equations, the relations of β and $\alpha, e_1^2, e_2^2, r_{01}, r_{02}, d_{12}$ and the initial configuration parameters of the compensating mirror are also gotten. There are two cases about the compensator: one is $\alpha > 0, \alpha > 1$, and the compensator is set in front of the curvature center of the tested mirror; the other is $\alpha < 0$, and the compensator is set in back of the curvature center of the tested mirror, both including $\beta > 0, \beta = 0, \beta < 0$. By analysing in detail, it is found that both the convex and the concave conicoid mirrors can be compensated and tested by mirror compensators, all cases of compensations and tests are included, some have been brought forward, but others have not, which benefits the general analysis of the compensation and the test.

Key words: imaging system; compensating test; third-order aberration theory; conicoid

1 引 言

20 世纪 Maksutov、Burch 和 Offner 对反射镜补偿检验二次曲面作了大量的研究^[1],1960 年潘君骅提出了凸面镜的反射镜补偿法,并对 $\alpha > 0$ 的一些情况进行了讨论。此补偿检验方法的原理是,点光源发出的光线经补偿镜 M_1 产生的球差与被检非球面镜 M_2 在曲率中心产生的球差大小相等、符号相反,使得光线由 $M_1 - M_2 - M_1$ 反射后再会聚于点光源处,则点光源处的三级球差得到平衡。本文从三级像差理论出发,推导出了反射镜补偿检验通用公

式,依据公式画出 $e_2^2/\alpha \sim \beta, \alpha r_{02}/r_{01} \sim \beta$ 的曲线图,并依据公式和曲线图对反射镜补偿检验的各种情况进行了系统全面的分析(即包含 $\alpha > 0$,也包含了 $\alpha < 0$ 的情况),提出了一些新的检验方法。在非球面加工过程中虽然以透射式补偿检验为主,但透射式补偿检验有很大的弱点:达耳(Dall)补偿器只能对中等以下的相对口径的非球面提供足够的补偿量,奥夫纳尔(Offner)补偿器结构复杂,装配难度较大。相对透射补偿检验来说反射镜补偿检验是一种比较可靠的方法,因为现代加工方法能将非球面加工到很

作者简介: 郝沛明(1940~),男,天津人,同济大学博士生导师,教授,主要从事光学系统设计、光学加工、光学检验、光学图像分析等的研究。E-mail: fulianxiao2003@126.com

收稿日期: 2005-06-08; 收到修改稿日期: 2005-09-06

高的精度,因此反射镜补偿检验能给非球面的加工检验带来很大的方便。

2 镜式补偿的像差理论

从三级像差理论可知,球差系数表示式为^[2]

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum hP + h^4 K, \\ h &= lu = l'u', \\ P &= \left(\frac{u' - u}{1/n' - 1/n} \right)^2 \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right), \\ K &= -(n' - n)e^2/r_0^3, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 e_1^2 为非球面偏心率, r_0 为非球面顶点曲率半径, n 和 n' 为反射镜前和后的介质折射率, h 为光线入射到

反射镜上的高度, u 和 u' 为入射到反射镜和从反射镜反射的光线与光轴的夹角^[3], L 和 L' 为入射到反射镜和从反射镜反射的光线与光轴交点离开非球面顶点的距离。如图 1 所示, M_1 为补偿反射镜, M_2 为待检非球面反射镜。从点光源 A 发出的光线经 $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_1$ 返回 A 点, 在 A 点可以进行刀口阴影检验。这样必须满足消球差的条件 $S_1 = 0$ ^[4]。

$$\begin{aligned} S_1 &= h_1 P_1 + h_1^4 K_1 + h_2 P_2 + h_2^4 K_2 + \\ &\quad h_3 P_3 + h_3^4 K_3 = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= 1, n'_1 = n_2 = -1, n'_2 = n_3 = 1, n'_3 = -1, \\ u_1 &= u'_3, u'_1 = u_2 = u'_2 = u_3, h_1 = h_3, P_1 = P_3, \\ K_1 &= K_3, P_2 = 0. \end{aligned}$$

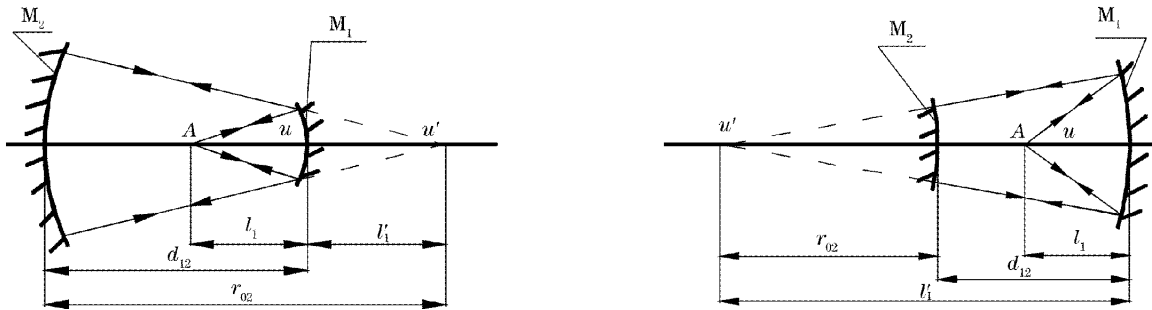


图 1 (a) $0 < \alpha < 1$, (b) $\alpha < 1$ 时补偿检验的光路图

Fig. 1 (a) Light path of compensating test of (a) $0 < \alpha < 1$, (b) $1 < \alpha$

将 n, n', u, u', P 和 K 代入(1)式和(2)式中得出

$$S_1 = 2h_1 \left(\frac{u'_1 - u_1}{1/n'_1 - 1/n_1} \right)^2 \left(\frac{u'_1}{n'_1} - \frac{u_1}{n_1} \right) - 2h_1^4 \frac{(n'_1 - n_1)e_1^2}{r_{01}^3} - h_2^4 \frac{(n'_2 - n_2)e_2^2}{r_{02}^3} = 0, \quad (3)$$

按图 1 所示, 设定口径比 α 、补偿镜的放大率 β 和根据近轴公式^[5]:

$$\alpha = \frac{h_1}{h_2}, \quad \beta = \frac{u}{u'_1} = \frac{l'_1}{l_1}, \quad u'_1 = u_2 = \frac{h_2}{r_{02}} = \frac{h_1}{\alpha r_{02}}, \quad l'_1 = \alpha r_{02}, \quad \frac{\alpha r_{02}}{r_{01}} = \frac{1 + \beta}{2}, \quad (4)$$

代入上式得出

$$\frac{e_2^2}{\alpha} = \frac{1}{4} [(1 + \beta)^2 e_1^2 - (1 + \beta)(1 - \beta)^2], \quad (5)$$

求 $e_2^2/\alpha = 0$ 时的 β 解:

$$\frac{e_2^2}{\alpha} = \frac{1 + \beta}{4} [(1 + \beta)^2 e_1^2 - (1 - \beta)^2] = 0, \quad \beta_1 = -1, \quad \beta_2 = \frac{1 - e_1}{1 + e_1}, \quad \beta_3 = \frac{1 + e_1}{1 - e_1}, \quad (6)$$

对(5)式进行偏微商 $\partial(e_2^2/\alpha)/\partial\beta = 0$ 求解曲线的两个拐点,

$$\begin{cases} \frac{\partial(e_2^2/\alpha)}{\partial\beta} = \frac{3}{4} e_1^2 (1 + \beta)^2 - \frac{1}{4} (3\beta^2 - 2\beta - 1), \\ \beta_4 = \frac{-(1 + 3e_1^2) + 2\sqrt{2 + 3e_1^2}}{3(e_1^2 - 1)}, \quad \beta_5 = \frac{-(1 + 3e_1^2) - 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3(e_1^2 - 1)}, \end{cases} \quad (7)$$

当 $\beta = \beta_4$ 时, e_2^2/α 取得拐点极小值:

$$\frac{e_2^2}{\alpha} = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{-4 + 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right)^2 e_1^2 - \left(\frac{6e_1^2 - 2 - 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right)^2 \left(\frac{-4 + 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right) \right], \quad (8)$$

当 $\beta = \beta_5$ 时, e_2^2/α 取得拐点极大值:

$$\frac{e_2^2}{\alpha} = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{-4 - 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right)^2 e_1^2 - \left(\frac{6e_1^2 - 2 + 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right)^2 \times \left(\frac{-4 - 2\sqrt{1 + 3e_1^2}}{3e_1^2 - 3} \right) \right]. \quad (9)$$

3 分 析

按(4)式和(5)式设定 $e_1^2 = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$, 画出 $e_2^2/\alpha \sim \beta, ar_{02}/r_{01} \sim \beta$ 的关系曲线如图 2, 按(4)式、(5)式和图2的曲线画出补偿检验的光路

如图 3。

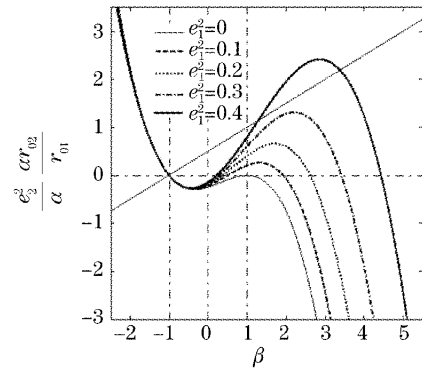


图 2 $e_2^2/\alpha \sim \beta, ar_{02}/r_{01} \sim \beta$ 的曲线
Fig. 2 Curves of $e_2^2/\alpha \sim \beta, ar_{02}/r_{01} \sim \beta$

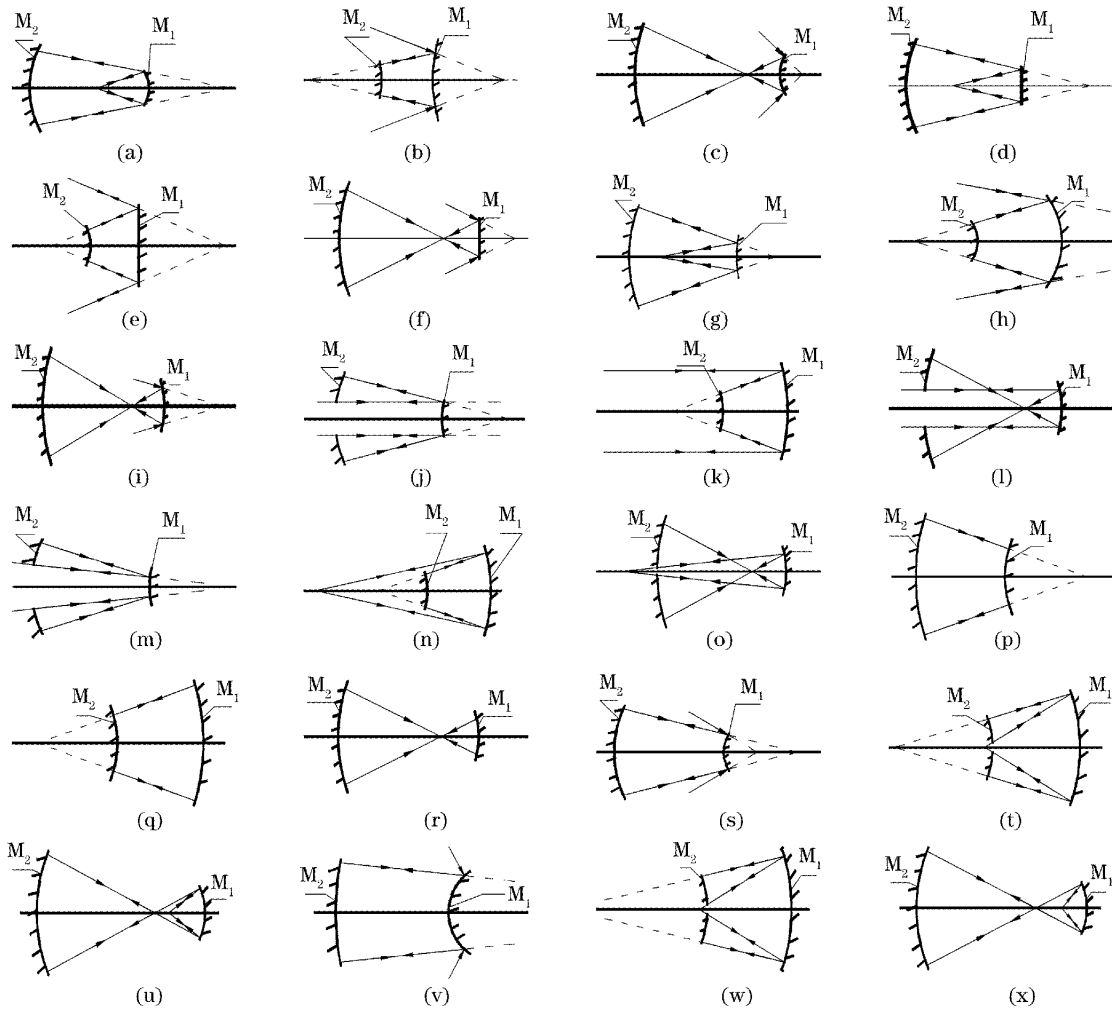


图 3 补偿检验的光路图

Fig. 3 Light path of compensating test

各参量的值列于表 1, 其中 1- 表示凹扁球面, 2- 表示凹球面, 3- 表示凹椭球面, 4- 表示凹抛物面, 5- 表示凹双曲面; 1+ 表示凸扁球面, 2+ 表示凸

球面, 3+ 表示凸椭球面, 4+ 表示凸抛物面, 5+ 表示凸双曲面; \searrow 表示会聚系统, \swarrow 表示发散系统, \odot 表示同心系统(激光谐振腔), $=$ 表示平行光系统。

表 1 补偿光路中各参量的值
Table 1 Parameters in light path of compensation test

No.	β	e_2^2/α	$\alpha r_{02}/r_{01}$	α	e_2^2	r_{02}/r_{01}	Test	Fig. 3	S
1	$-\infty \sim -1$	>0	<0	$0 \sim 1$	>0	<0	2-, 3-, 4-, 5-	(a)	↙
2				>1	>0	<0		(b)	↗
3				<0	<0	>0		(c)	↙
4	-1	0	0	$0 \sim 1$	0	0	2-	(d)	↙
5				>1	0	0		(e)	↗
6				<0	0	0		(f)	↗
7	$-1 \sim 0$	<0	>0	$0 \sim 1$	<0	>0	1-	(g)	↙
8				>1	<0	>0		(h)	↗
9				<0	>0	<0		(i)	↗
10	0	<0	>0	$0 \sim 1$	<0	>0	1-	(j)	=
11				>1	<0	>0	1+	(k)	=
12				<0	>0	<0	3-	(l)	=
13	$0 \sim \beta_2$	<0	>0	$0 \sim 1$	<0	>0		(m)	↗
14				>1	<0	>0	1+	(n)	↙
15				<0	>0	<0	3-	(o)	↙
	β_2	0	>0		0				
16	1	>0	>0	$0 \sim 1$	>0	>0		(p)	⊙⊙⊙
17				>1	<0	>0		(q)	
18				<0	>0	<0			
19	$\beta_2 \sim \beta_3$	>0	>0	$0 \sim 1$	>0	>0	1-	(s)	↗
20				>1			2+, 3+, 4+, 5+	(t)	↙
21				<0				(u)	↙
	β_3	0	$0 > 0$		0				
22	$\beta_3 \sim \infty$	<0	>0	$0 \sim 1$	<0	>0	1+	(v)	↗
23				>1	<0	>0	2-, 3-, 4-, 5-	(w)	↙
24				<0	>0	<0		(x)	↙

4 设计方法

要求加工的二次曲面(待检镜)参量通光口径 $\Phi_0 = 2h_2$ 、顶点曲率半径 r_{02} 和偏心率 e^2 是给定的, 根据这些参量就可以进行设计补偿检验系统, 设计步骤如下:

1) 已知待检镜的通光口径 $\Phi_0 = 2h_2$ 和偏心率 e^2 , 选择 α , 根据(4)式、(5)式和曲线图 2 确定补偿镜的放大率 β 、偏心率 e_1^2 , 根据(3)式确定补偿镜的光线高度 $h_1 = h_2/\alpha$;

2) 根据(4)式确定补偿镜的 $l'_1 = \alpha r_{02}$, $l_1 = l'_1 \beta$;

3) 根据(4)式和(5)式, α 、 β 和曲线图 2 确定补偿镜的 $r_{01} = 2\alpha r_{02}/(1+\beta)$;

4) 已知 h_1 和 l_1 , 就可以求出补偿镜的起始角 $u_1 = h_1/l_1$;

5) 已知 r_{02} 和 l'_1 , 就可以求出补偿镜和待检镜之间的间隔 $d_{12} = -(r_{02} - l'_1)$;

6) 已知补偿镜的 l_1, u_1, r_{01}, e_1^2 和 d_{12} , 就可以跟

踪光线, 进行像差平衡^[6], 使球差 $LA' = 0$, 得出精确的 l_1, u_1, r_{01}, e_1^2 。

5 结 论

通过公式推导、画曲线图和分析可以看出: 镜式补偿可以检验各种二次曲面; 分析既包括前人提出的各种解, 还发现前人没有提出的各种解; 补偿镜采用凹椭球面 ($0 < e_1^2 < 1$) 解决了补偿检验凸二次曲面 ($1 < e_2^2$) 的难题, 这对非球面设计、加工和检验都是有益的。随着现代科技的发展, 利用现代的加工方法能将非球面加工到很高的精度, 这使得反射镜补偿检验是非常有用的^[7]。

参 考 文 献

- 1 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. Bai Guoqiang, Xue Junao transl., Beijing: China Machine Press, 1983. 397~416 (in Chinese)
- D. 马拉卡松. 光学车间检验[M]. 白国强, 薛君敦译. 北京: 机械工业出版社, 1983. 397~416

- 2 Hap Peiming. The Eyepiece of aspheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1389~1393 (in Chinese)
郝沛明. 非球面目镜[J]. 光学学报, 1997, **11**(10): 1389~1393
- 3 Hao Peiming, Wang Peng, Hu Xiaoyang. Optical system with two-lens zero focal power corrector and single mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 1017~1020 (in Chinese)
郝沛明, 王 鹏, 胡晓阳. 无光焦度校正器和单一反射镜组成的光学系统[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 1017~1020
- 4 Pan Junhau. *The Design, Manufacture and Test of the Aspheric Surface of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1994. 61~66 (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工及检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 61~66
- 5 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 19~20 (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 19~20
- 6 Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 494~496 (in Chinese)
郝沛明, 王 鹏, 王占山 等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 494~496
- 7 Yang Li. *Manufacturing Technology of the Sophisticated Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 352~357 (in Chinese)
杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 352~357

第二届中国科学院冷原子物理国际学术研讨会通知

The Second International Symposium on Cold Atom Physics of Chinese Academy of Sciences

会议时间: 2006 年 7 月 24~29 日

会议地点: 中国浙江省千岛湖

主办单位: 中国科学院、国家自然科学基金委员会、中国物理学会原子分子物理专业委员会

承办单位: 中国科学院冷原子物理研究中心, 中国科学院上海光学精密机械研究所

会议宗旨: 第二届中国科学院冷原子物理国际学术研讨会 ISCAP-II 将于 2006 年 7 月 24 日至 29 日在浙江千岛湖举行, 会议由中国科学院、国家自然科学基金委员会、中国物理学会原子分子物理专业委员会共同举办, 由中科院冷原子物理中心承办。中科院冷原子物理研究中心由上海基地和武汉基地组成。上海基地依托于上海光学精密机械研究所上海光学精密机械研究所量子光学实验室, 武汉基地依托于武汉物理与数学所波谱与原子分子物理国家重点实验室。研讨会将为全世界的华人学者提供研讨冷原子物理及相关原子分子与光物理领域的研究进展、促进学术交流和相互了解的机会。

会议主席: 王育竹(中科院上海光机所)

叶朝辉(中科院武汉物数所)

本地组织委员会: 韩申生, 刘亮, 魏青, 付海翔, 周善钰

会议专题(分会场): 1) 原子和分子玻色-爱因斯坦凝聚; 2) 费米简并气体和 BEC-BCS crossover; 3) 激光冷却与囚禁; 4) 量子光学与量子相干; 5) 量子信息与量子计算; 6) 时间频率标准; 7) 激光光谱与精密测量; 8) 原子分子物理理论和实验新技术; 9) 冷原子物理的其它应用。

会议论文提交截止时间: 2006 年 6 月 15 日

承办单位地址: 上海市嘉定区清河路 390 号, 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 邮编: 201800

电 话: 021-69918470; **传 真:** 021-69918800

联 系 人: 付海翔; **电子信箱:** hxfu@mail.siom.ac.cn

本次会议建立了会议网站, 网址: <http://www.siom.cn/iscap>