

文章编号: 1001-3806(2009)03-0236-03

抛物面反射镜同轴控制技术的研究

罗曦, 陈培锋*, 王英, 金平

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了实现对导弹导引头红外跟踪系统中抛物面反射主镜的装配角度进行监控和调试, 提出了一种通过电荷耦合器件接收抛物面反射镜的聚焦光斑, 同时旋转抛物面镜, 采集光斑重心位置信息, 并利用最小二乘法对光斑重心轨迹进行拟合, 从而计算出光轴与结构中心轴之间的偏心角的实现方案。对实现方案进行了理论分析和实验验证, 不同于通常的透射聚焦镜关系, 得到该环状抛物面反射主镜的装配偏心角 α 与焦斑重心轨迹圆半径 R 间的线性关系式中的系数为 1.13。结果表明, 该系统能够应用于对抛物面反射主镜装配角度的测试和监控。

关键词: 光电子学; 偏心角测量; 光线追迹; 环状抛物面镜

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Study on coaxial control technology of parabolic mirrors

LUO Xi, CHEN Pei-feng, WANG Ying, JIN Ping

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to monitor and test the setting up angle of the parabolic mirror of the infrared tracking system of the missile seeker in the assembly process, a new approach was brought up, in which a CCD (charge coupled device) was used to receive the focusing spot of the parabolic mirror and collect the center of gravity of the focusing spot while rotating the parabolic mirror. The track of the center of gravity of the spot was fitted with the least square method, so the eccentric angle between the optical axis of the parabolic mirror and the structural central axis could be found. The method was analyzed in theory and proved in experiments. Different from the traditional transparent focusing system, the eccentric angle of the ring parabolic mirror was proportional to the radius R of the track circle of the center of gravity of the focusing spot with a coefficient of 1.13. The experimental results indicate that the system meets the need to monitor and test the setting up angle of the parabolic mirror.

Key words: optoelectronics; eccentric angle measurement; ray track; ring parabolic mirror

引言

随着磨制^[1]、测试^[2]、装调^[3]技术的快速发展, 抛物面镜广泛应用于激光聚焦、准直^[4]、大口径红外成像系统及红外跟踪系统中^[5-6]。在导弹导引头红外跟踪系统中, 抛物面反射镜是其中的重要部件, 因而对其装配和测试提出了很高的要求。其装配角度直接影响到光学系统的成像质量, 因此, 必须对抛物面反射镜的装配角度进行监控和调试。根据上述需求, 作者提出了一种通过电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 接收环状抛物面反射镜的聚焦光斑, 同时旋转抛物面镜, 采集光斑重心位置信息, 并对光斑重心轨迹进行拟合, 从而计算出光轴与结构中心轴之间的偏心角的实现方案。通过对方案原理进行理论分析和实验验证, 实现了对环

状抛物面反射主镜装配角度的测试和监控。

1 测量方案

如图 1 所示, 实验装置主要用来测量安装过程中机械轴与环状抛物面主镜光轴间的微小偏心角。装置

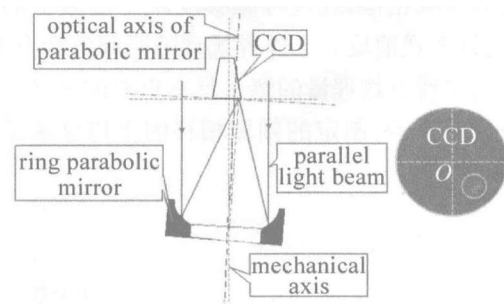


Fig. 1 The experimental device of eccentric angle measurement

产生平行于机械轴方向的可见平行光照射到抛物面反射镜上, CCD 探测器垂直于机械轴放在抛物面镜焦点处。理想情况下, 抛物面镜光轴与机械轴重合, 反射光束将聚焦于 CCD 上形成一个光点; 由于装配过程的误差, 使抛物面镜光轴与机械轴之间存在微小偏心角, 那

作者简介: 罗曦 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事是光电检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2008-05-12; 收到修改稿日期: 2008-07-01

么由于离焦作用,反射光束将在 CCD 上形成一个光斑。

测量过程中,由于主镜光轴与机械转轴之间存在微小偏心角,当转动反射镜的机械轴时,CCD 像面上的光斑会以一定的半径 R 沿着机械轴心投影划圆,如图 2 所示。图中 P 点为抛物面镜光轴与机械轴的交

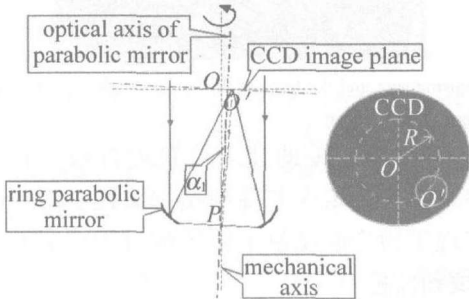


Fig. 2 The process of eccentric angle measurement

点, O' 为光斑重心。设备随机提取轨迹上光斑重心的位置坐标,得到扫描圆半径 R ,即光斑重心偏离中心 O 的距离。从而计算出主镜光轴与机械转轴之间的偏心角。

2 光斑分析

对于抛物面镜,在理想情况下,入射光严格平行于光轴时,反射光聚焦于抛物面镜的焦点。但在实际的装配过程中,主镜光轴与机械转轴不可能严格平行,导致入射平行光束与主镜光轴失准,反射光束将在抛物面镜焦面处形成一光斑。

上述测量装置主要是利用提取轨迹上光斑重心的位置坐标进行偏心角测量的,因此,有必要对离轴情况下环状抛物面镜在焦面处的光斑分布情况进行分析。

利用光路追迹法,假设入射光束为均匀分布的圆光束^[7],选取入射光点阵见图 3。

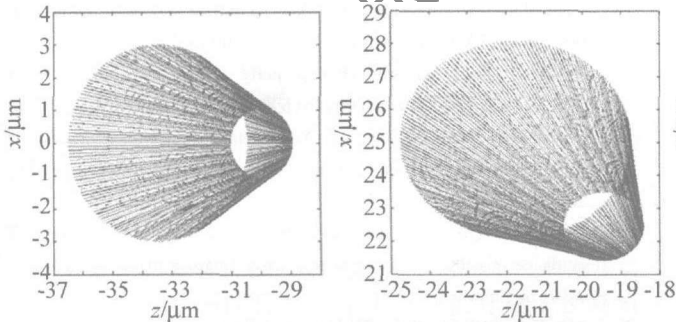


Fig. 4 The spot distribution and track in the focal plane of the ring parabolic mirror, while the incident parallel light rotating around the optical axis

变,并绕光轴旋转 1 周的过程中,主镜焦面处的光斑分布及其运动轨迹如图 4 所示。

从图 4 可知,焦面处出现离焦现象,光斑光强分布不均匀。该反射主镜的环状结构,使其聚焦光斑内部有一空心存在。整个光斑呈彗星状分布,光斑内侧的光强明显强于光斑外侧的光强。在入射平行光束绕着

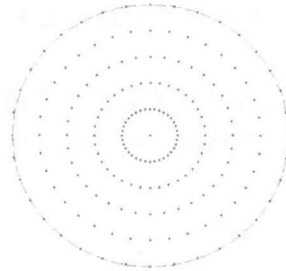


Fig. 3 The incident light lattice

取由图中任意一点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 发出的人射光线方向角为 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$, 其与 x, y, z 3 个轴所成的夹角分别为: α, β, γ 。则可以得到相应的入射线方程为:

$$\frac{x - x_0}{\cos\alpha} = \frac{y - y_0}{\cos\beta} = \frac{z - z_0}{\cos\gamma} \quad (1)$$

设环状抛物面反射主镜方程为:

$$x^2 + z^2 = 4fy \quad (R_1 \leq \sqrt{x^2 + z^2} \leq R_2) \quad (2)$$

联解(1)式、(2)式,可以求得入射光线与抛物面的交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 。

由(2)式可以得到交点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 处抛物面的法线方程为:

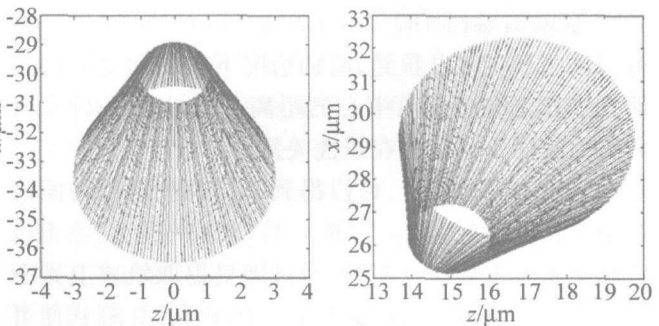
$$\frac{x - x_1}{x_1} = \frac{y - y_1}{-2f} = \frac{z - z_1}{z_1} \quad (3)$$

利用光线矢量的夹角关系,便可以唯一的解出反射光线的方向角 $(\cos\alpha_1, \cos\beta_1, \cos\gamma_1)$, 于是,就可以求得反射光线为:

$$\frac{x - x_1}{\cos\alpha_1} = \frac{y - y_1}{\cos\beta_1} = \frac{z - z_1}{\cos\gamma_1} \quad (4)$$

只要取遍图 3 中所有的点,就可以得到焦面处的光斑分布情况。

根据实际情况,这里取环状抛物面反射主镜的焦距 $f = 40\text{mm}$, 外径 $D_2 = 48\text{mm}$, 内径 $D_1 = 30\text{mm}$ 。当入射平行光束与该主镜光轴保持微小夹角(约 $2.4'$)不



光轴旋转的过程中,抛物面镜焦面处的聚焦光斑以一定的轨迹划圆,且运动过程中光斑的形状保持不变。

3 光斑重心轨迹拟合

光斑中心检测是光学测量中常用的关键技术^[8]。传统的光斑中心的检测算法有重心法^[9-10]、中值法、多

项式拟合法^[11]。在此采用光斑重心来代替聚焦光斑的中心。

如图5所示,当平行光束以一定的微小离轴角 α 入射时,抛物面镜焦面处的光斑重心 O' 会偏离中心 O 一定的距离 R 。

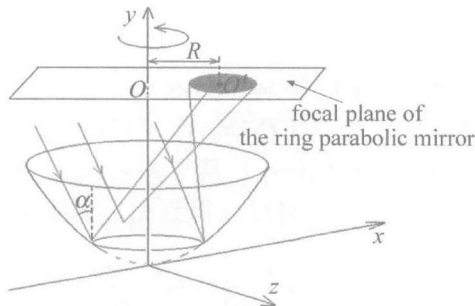


Fig. 5 The principle of eccentric angle measurement

当入射平行光束以此固定的离轴角 α 绕抛物面镜光轴旋转时,焦面处的光斑重心会以此 R 为半径划圆。采集抛物面镜在焦面处的光斑重心位置信息,通过最小二乘法^[12]对光斑重心轨迹进行曲线拟合,便可以得到扫描圆的半径 R 。

通过考察不同离轴角度 α 下,抛物面镜焦面处的光斑重心 O' 偏离中心 O 的距离 R ,可以得到以下的关系曲线,见图6,其中离轴角度 α 的变化范围是:0mrad~1.45mrad(约0'~5')。

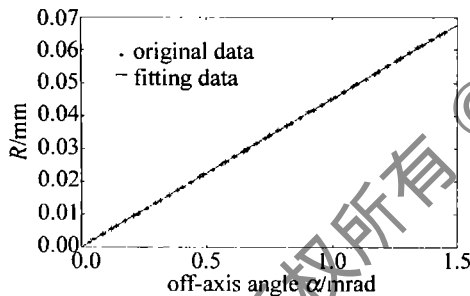


Fig. 6 The curve of off-axis angle and the distance between the center of gravity of spot and the centre in the focal plane

从图6中可以看到,离轴情况下抛物面反射镜焦面处的光斑重心偏离中心的距离 R 与入射平行光束的离轴角度 α 之间存在线性关系。

通过多项式拟合,可以得到它们两者与抛物面镜焦距 f 之间的关系式: $R = 1.13f\alpha$ (5) 因此在偏心角测量方案中,通过随机提取轨迹上光斑重心的位置坐标得到扫描圆半径 R ,再利用(5)式便可以计算出主镜光轴与机械转轴之间的偏心角。

但同时也可以看出:抛物面镜离轴光线的焦点与偏离角之间的关系(5)式中存在一个1.13的系数,这个关系与通常的透射聚焦镜的关系不同。

测量过程中,该实验装置实际聚焦光斑情况及光

斑重心轨迹如图7所示。

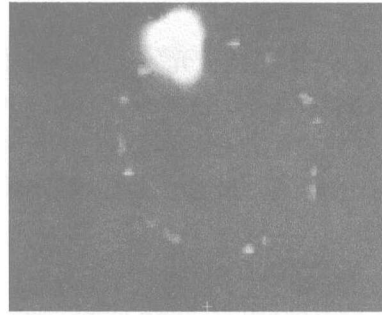


Fig. 7 Focusing spot and the track of the center of gravity of the spot on the experimental device

通过对抛物面镜的装配位置进行微调 and 重复测量,最终可将偏心角误差降到抛物面镜装配误差容限以内,实现了抛物面反射主镜装配过程中对其装配角度的测试和监控。

4 结论

抛物面反射镜是导弹导引头红外跟踪系统中的重要部件,其装配角度直接影响到光学系统的像质,因而对其装配和测试提出了很高的要求。提出了一种通过CCD接收抛物面反射镜的聚焦光斑,同时旋转抛物面镜,采集光斑重心位置信息,从而计算出光轴与结构中心轴之间的偏心角的实现方案,实现了装配过程中对环状抛物面反射主镜装配角度的测试和监控。

参考文献

- [1] CUI X Q, GAO B L, WANG X D. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25 (3): 402-407 (in Chinese).
- [2] PAN J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (12): 1475-1478 (in Chinese).
- [3] ZHANG B, HAN Ch Y. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21 (1): 1475-1478 (in Chinese).
- [4] LIANG P. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26 (6): 909-913 (in Chinese).
- [5] DIAO W H, MAO X, DONG X Y. Research on detection distance of infrared homing head upon cruise missile [J]. Infrared, 2008, 29 (2): 26-37 (in Chinese).
- [6] FANG Y P, QIAN J P. Jamming technology research to the imaging IR guidance missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29 (3): 7-14 (in Chinese).
- [7] SHI H B, CHENG Zh G, XU G L, et al. Study on focusing spot characteristics by off-axis parabolic mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27 (10): 880-886 (in Chinese).
- [8] KONG B, WANG Zh, TAN Y Sh. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31 (3): 275-279 (in Chinese).

(下转第242页)

式、(6)式可知,利用马赫-曾德尔外差干涉仪测量光的偏振态,非线性误差参量 $\alpha, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 σ 固定时,测量误差并非一个常量,还取决于待测光的椭圆偏比 ψ 和 s, p 分量相位差 δ 。图3中给出了测量误差与 ψ 及 δ 的关系,图中所用的参量为 $\alpha = 0.01, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.001, \sigma = 0.01^\circ$ 。由图3可知,马赫-曾德尔与迈克尔逊外差干涉仪测量误差相近,在实际应用中两者的误差近似相等。如在 $\psi = 1, \alpha = 0.01, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.005, \sigma = 2^\circ$ 时,马赫-曾德尔外差椭圆偏仪的相位角误差相当于同参量下的迈克尔逊外差干涉仪在波长为532nm时距离测量的误差为3.38nm,与同误差参量下迈克尔逊外差干涉仪的误差计算结果相近^[9]。

4 结论

分析了马赫-曾德尔外差干涉椭圆偏仪非线性误差,给出了光源偏振椭圆化,偏振分光棱镜不完全消偏和倾斜引起的误差公式。测量误差不仅与误差参量 $\alpha, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \sigma$ 有关,同时还与测量光的椭圆偏比 ψ 及两偏振分量的相位差 δ 有关。误差分析结果显示,马赫-曾德尔与迈克尔逊外差干涉仪误差相近。在利用马赫-曾德尔干涉技术测量时,需要优化参量 $\alpha, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \sigma$ 以提高测量精度。

参考文献

- [1] CRANE R. Interference phase measurement [J]. *Appl Opt*, 1969, 8(3): 538-542.
- [2] QUENELLE R C. Nonlinearity in interferometer measurements [J]. *Journal of Hewlett Packard*, 1983, 34(4): 10-12.
- [3] SUTTON C M. Nonlinearity in length measurements using heterodyne laser Michelson interferometry [J]. *J Phys*, 1987, E20(10): 1290-1292.
- [4] XIE Y, WU Y Z. Elliptical polarization and nonorthogonality of stabilized Zeeman laser output [J]. *Appl Opt*, 1989, 28(11): 2043-2046.
- [5] de FREITAS J, PLAYER M. Importance of rotational beam alignment in the generation of second harmonic errors in laser heterodyne interferometry [J]. *Measurement Science & Technology*, 1993, 4(10): 1173-1176.
- [6] HOU W, WILKENING C. Investigation and compensation of the non-linearity of heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(2): 91-98.
- [7] WU Ch M, DESLATTES R D. Analytical modeling of the periodic non-linearity in heterodyne interferometry [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(28): 6696-6670.
- [8] COSIJNS S J A G, HAITJEMA H, SCHELLEKENS P H J. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(4): 448-455.
- [9] ZHONG Zh, TAN J B, CHEN H F, et al. A novel method to measure the nonlinearity in laser heterodyne interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(7): 817-820 (in Chinese).
- [10] DAI G L, YIN Ch Y, XIE G P. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12): 1697-1702 (in Chinese).
- [11] NING Zh G, CHENG Zh G, GAO H J. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(6): 852-855 (in Chinese).
- [12] CHEN H F, DING X M, ZHONG Zh, et al. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1281-1285 (in Chinese).
- [13] LI Y Q, LI X Y, ZHU M Q. A new method to correct the nonlinear errors in heterodyne interferometry [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(5): 542-546 (in Chinese).
- [14] XIANG Y J. Research on all-fibre optical heterodyne technique [J]. *Laser Technology*, 1994, 18(4): 207-210 (in Chinese).
- [15] CHIEN Ch T, CHIEN Ch, CHIEN Y H, et al. Determination of optical parameters of a twisted-nematic liquid crystal by phase-sensitive optical heterodyne interferometric ellipsometry [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(35): 7509-7514.
- [16] HSIU F Ch, CHIEN Ch, HUI K T, et al. The use of polarization modulation and amplitude-sensitive optical heterodyne interferometry for linear birefringence parameters measurement [J]. *Opt Commun*, 2006, 260(5): 420-426.
- [17] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh Ch, et al. Study on heterodyne ellipsometry and error analysis of frequency mixing [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(6): 438-440 (in Chinese).

(上接第238页)

- [9] KONG B, WANG Zh, TAN Y Sh. Gaussian fitting technique of laser spot [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(4): 277-278 (in Chinese).
- [10] WANG F R, ZHAO D X, LIAO Z J, et al. Research of laser spot center space orientation [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 87-89 (in Chinese).
- [11] XU Y M, XING Ch, LIU G L. Comparisons of several methods of laser spot center detection [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 74-76 (in Chinese).
- [12] LI H. Numerical analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003: 63-70 (in Chinese).