

星载激光测距仪扩束系统的高精度装调

穆生博, 宋俊儒, 李洋, 焦文春

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 星载激光测距仪扩束系统为无焦系统, 对光学装调有着苛刻的要求, 装调精度是决定激光测距仪工作能力的关键因素。利用计算机辅助装调技术, 确定光学系统对光学元件的敏感度和补偿调整参量。针对镜间距影响该系统性能参数的特点, 提出采用高精度三坐标测量技术和双光路定心技术对扩束系统装调。最后, 采用 1064 nm 干涉仪对光学系统像质进行测试, 使用套孔法对束散角进行测量。测试结果表明: 该星载激光测距仪扩束系统 RMS 优于 0.225λ , 束散角为 0.41 mrad, 满足设计要求。

关键词: 激光测距仪; 高精度装调; 扩束系统; 发散角

中图分类号: V44 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0306006

High accuracy alignment of beam expander of a space-borne laser range finder

Mu Shengbo, Song Junru, Li Yang, Jiao Wenchun

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The beam expander of a space-borne laser range finder was an afocal telescope, the alignment requirement of which was rigorous. The alignment accuracy was the key factor of the capability of the laser range finder. The sensitivity of optical element and the compensator were obtained by means of computer aided alignment. High precision coordinate measuring and dual-path centering technology were presented, being aimed at the characteristic of performance parameter determined by distance of elements. Finally the wavefront of the system was tested by the 1064 nm interferometer, the divergence angle was tested using a pin-hole. The result demonstrates that the RMS of the system is better than 0.225λ and the divergence angle is 0.41 mrad. The results meet the requirement of design.

Key words: laser range finder; high precision assembling; beam expander; divergence angle

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-14

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 穆生博(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学装调与检测方面的研究。Email: msb_20050390@126.com

0 引言

星载激光测距仪主要用于空间中测量目标卫星与本体卫星之间的距离,或者测量某目标星体表面与本体卫星之间的距离^[1]。随着空间对抗及空对地探测技术的发展,国内外出现了许多以激光测距仪为主体的卫星载荷,如 NASA 的 NLR^[2]、MOLA^[3]、中国的 CELA^[4]等。随着激光测距系统的发展,测距能力要求的提升,其结构越来越复杂,

激光功率也不断提高,随之对激光通过扩束系统的光束质量的要求也越来越高。在空间激光测距系统中,对激光光束的平行度,即发散角和聚焦光斑的要求非常高,因此,由激光扩束系统对出射激光进行光束整形和变换是确保激光传输质量的重要方法之一。目前,常用的激光扩束系统有反射式、折射式和折反射式^[5],当要求有较大光束出射口径时,应该选用反射式扩束系统,在满足扩束口径要求时,尽量选择折射式,因为折射式系统结构简单,装调方便。文中主要讨论某折射式扩束系统装调。

1 激光扩束镜原理

1.1 单透镜对高斯光束发散角的影响^[6]

设一束高斯光束的束腰半径为 ω_0 ,其发散角为:

$$\theta_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (1)$$

通过焦距为 F 的透镜后,其束腰半径为 ω_0 ,则高斯光束的发散角为:

$$\theta_0' = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{1}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

1.2 扩束系统对高斯光束的准直

以 θ_0 表示入射高斯光束的发散角, θ_0' 表示经过短焦距透镜(焦距为 F_1)后的高斯光束发散角, θ_0'' 表示经过长焦距透镜(焦距为 F_2)后出射的高斯光束发散角, ω_0 应恰好落在长焦距透镜的后焦面上,所以束腰半径为 ω_0 的高斯光束能被长焦距透镜很好的准直。则该扩束系统对高斯光束的准直倍率 M' 定义为:

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta_0''} \quad (3)$$

根据高斯光束的特征和透镜变换关系,可求得扩束系统对高斯光束的准直倍率

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta_0''} = M \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l}{\pi \omega_0}\right)^2} \quad (4)$$

式中: $M = F_2/F_1$, 为扩束系统长焦距透镜与短焦距透镜的焦距比。由此可得出,在高斯光束的结构参数 f 以及束腰半径到短焦距透镜的距离 l 一定,扩束倍率越大,高斯光束通过扩束系统后的发散角就越小。

2 激光扩束系统的装调

2.1 激光扩束系统设计

某激光扩束系统为伽利略式望远系统,光束先通过一个负透镜(组)产生发散,再通过一个正透镜(组)复原成平行光。设计出射光束发散角 ≤ 0.45 mrad, $RMS \leq 0.3$ 。光学模型如图 1 所示。

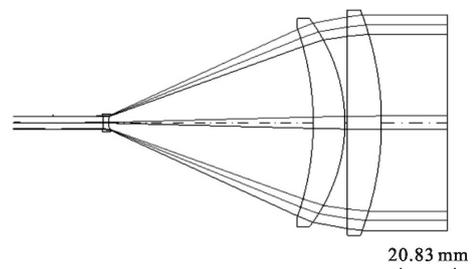


图 1 激光扩束镜头光学系统图

Fig.1 Optical system of laser beam expander lens

该扩束系统由一个短焦距的负透镜 L_1 和一个长焦距的正透镜组 L_2 组成。由理论分析可知,负透镜 L_1 的像方焦点应该位于正透镜组 L_2 的后焦面上。其中,负透镜 L_1 与第二片透镜的镜间距用来补偿由透镜组 L_2 两片透镜镜间距误差带来的 L_2 的焦距误差,以保证其扩束倍率及束散角满足指标要求。

2.2 激光扩束系统装调

激光扩束系统重要指标为发散角,在入射光束束腰位置和发散角一定的前提下,由公式(4)可知,影响出射光束发散角的因素为正负透镜焦距比。对于该系统,正透镜组 L_2 的焦距取决于正透镜组两片透镜的镜间距,而出瞳位置取决于负透镜 L_1 的像方焦点是否与正透镜组的焦点重合。故装调重点在于系统镜间距的测试,如何准确的测试出系统的镜间距是保证系统参数准确的基础,对该系统镜间距测试可以使用高精度三坐标测量机。该系统为增透 1064 nm 波长的透射式系统,可透过可见光,进行定心装调则可以使用 OptiCentric 双光路定心仪。装调流程如图 2 所示。

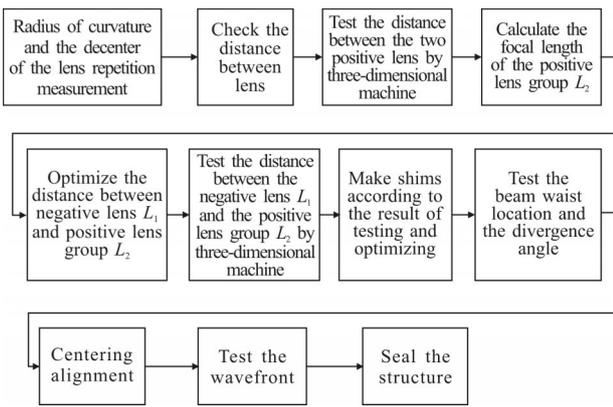


图 2 激光扩束系统装调流程

Fig.2 Assembling process of laser beam expander

2.2.1 计算机辅助装调

将实测的透镜曲率半径和中心厚度输入到光学系统优化设计软件中, 然后重新对系统的镜间距进行优化, 并且通过正负透镜焦距比计算放大倍率是否满足要求^[7], 如表 1 所示。

表 1 透镜组 L_2 镜间距、焦距、透镜 L_1 、 L_2 间距变化关系(单位: mm)

Tab.1 Relationship between lens group L_2 , focal length, and the distance between L_2 and L_1 (Unit:mm)

Distance between lens group L_2	Focus of lens group L_2	Distance between L_2 and L_1
+0.1	+0.024 6	-0.025 2
-0.1	-0.024 6	+0.011 6

2.2.2 镜间距装调

对正透镜组 L_2 中透镜 2 和透镜 3 进行镜间距测量, 如图 3 所示, 通过步骤 1 拟合中心获得步骤 2

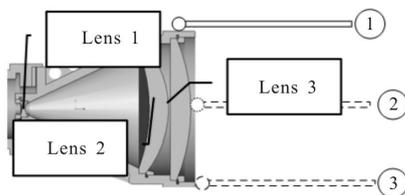


图 3 透镜 3 到结构端面的距离

Fig.3 Distance between the lens 3 and the cross section

的位置, 然后通过步骤 2 和步骤 3 测出透镜 3 右顶点到结构端面的距离 d_3 。取出透镜 3, 同样的方法可

得到透镜 2 右顶点到结构端面的距离 d_2 , 如图 4 所示。则透镜 2 和透镜 3 的镜间距由下式得到:

$$D=d_3-d_2-H_3 \quad (5)$$

式中: H_3 为透镜 3 的中心厚度。

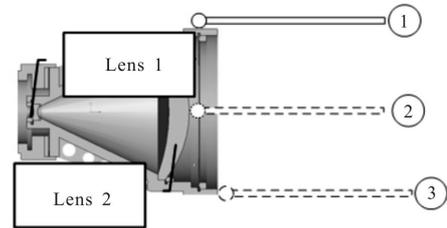


图 4 透镜 2 到结构端面的距离

Fig.4 Distance between the lens 2 and the cross section

将公式(6)中求得的 D 代入光学系统仿真软件中, 可优化得出透镜 1 到透镜 2 之间的镜间距, 并可以求出正透镜组 L_2 的焦距, 通过公式(4)可计算出放大倍率是否满足要求。如不满足要求, 则需要调节透镜 2 和透镜 3 的镜间距, 直至放大倍率满足要求。

镜间距测量精度分析:

(1) 三坐标机单点测量精度 $\leq 1 \mu\text{m}$, 镜筒外圆基准圆度误差 0.01 mm, 则采用最小二乘拟合圆心误差 $\leq 5 \mu\text{m}$;

(2) 透镜与镜筒单边间隙 0.1 mm, 根据透镜曲率半径和拟合圆心误差, 可算出镜间距测试误差 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 。

2.2.3 定心装调

透镜定心可选用 OptiCentric 双光路定心仪进行定心装调。将扩束系统固定在定心工装上, 定心工装固定在定心仪转台上, 然后用千分表分别检测镜筒外圆和端面的基准, 调整定心仪转台的倾斜和平移, 直至在转台旋转一周的过程中千分表的跳动量小于 0.01 mm, 如图 5 所示。

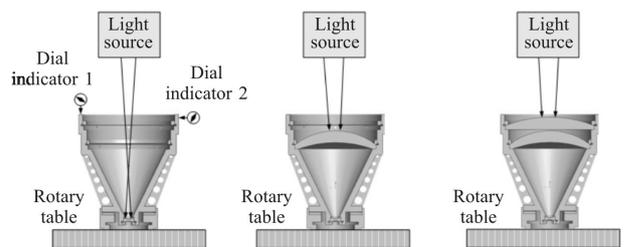


图 5 透镜组件定心装配示意图

Fig.5 Figure of centering assembly of lens group

分别对透镜 1、透镜 2 和透镜 3 进行定心,通过调整每一片透镜的平移和倾斜,将透镜上下两个表面的球心像平移调整至 0.01 mm 以下,倾斜调整至 10"以下。调整完成后,压紧每一片透镜的压圈,并保证压紧的同时球心像不动。

定心装调误差分析如下。

(1) 千分表的测量误差:千分表的测量误差为 0.001 mm,镜筒的外径为 100 mm,镜头会产生约为 2"的倾斜;

(2) 忽略定心仪转台轴系误差,定心仪测量误差为倾斜 0.2",平移 0.5 μm;

(3) 单独镜片倾斜调整误差 1"以下,平移调整精度在 0.01 mm 以下;

(4) 系统共有三片透镜,千分表测量一次,定心三次,故可求得整体误差为:平移 0.02 mm,倾斜 2.7",满足光学系统设计敏感度要求。

3 系统测试

在完成镜头装配后,使用 1 064 nm 干涉仪对扩束镜波像差进行测试。测试结果如图 6 所示。其中 RMS=0.225,Power=-0.826 1。在测试过程中,对 Power 进行精确调整,将 Power 值调整至设计值,同时整体 RMS 值满足设计要求,则可与激光器连调,进行发散角和束腰位置测试。

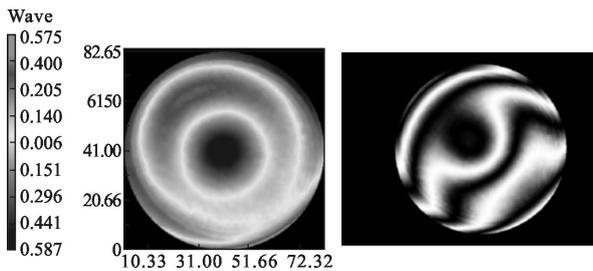


图 6 系统波像差测试结果

Fig.6 Result of wavefront error test

利用大口径平行光管和套孔法^[9]测试对出射光束的发散角和束腰位置进行测试。利用平行光管焦面处放置的激光成像纸对激光进行打点成像。沿平行光管光轴前后移动激光成像纸,找到光斑最小的位置。若扩束后的发散角和束腰位置满足设计要求,则经过平行光管汇聚后的最小光斑位置应位于平行光管焦面处,如图 7 所示。将激光成像纸换成小孔,

利用套孔法计算发散角,可由下式得到:

$$\theta = \arctan \frac{r}{f} \tag{6}$$

式中: r 为孔半径; f 为平行光管焦距。

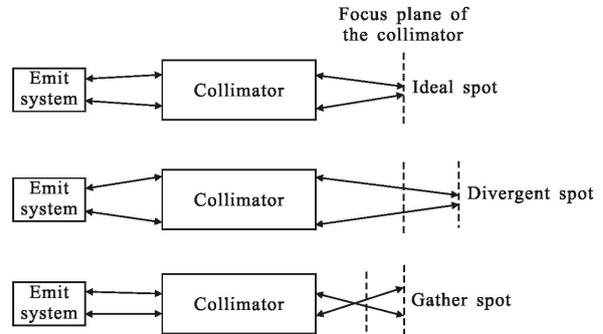


图 7 不同状态下系统束腰位置测试示意图

Fig.7 Beam waist test of the system at different states

不同状态下在平行光管焦面处得到的激光光斑如图 8 所示。

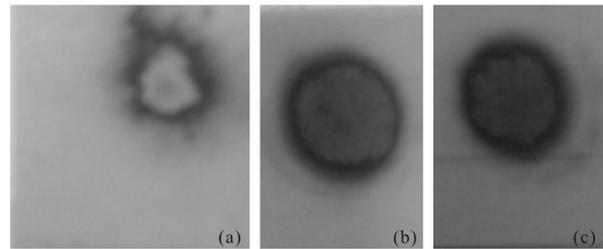


图 8 理想、发散和汇聚三种状态下,平行光管焦面处得到的光斑

Fig.8 Faculas at the focus plane of collimator at three states of ideal, expending and assembling

4 结论

图 6 所示 1 064 nm 干涉仪测试结果为最终装调结果,除去干涉仪调校产生的-0.5 Wave 的 Power,系统 Power=-0.326 1 和 RMS=0.225 值均满足设计要求。利用套孔法测出系统发散角为 0.41 mrad,满足设计要求。

由此可见,利用三坐标、双光路定心仪和干涉仪配合对激光扩束系统的装调方法是合理的、可行的。

参考文献:

[1] Zhu Jin, Sun Shijun. The echo signal simulation and analysis of the laser rangefinder [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 2(1): 67-78. (in Chinese)
朱近,孙世君. 星载激光测高仪回波信号仿真分析 [J]. 航

- 天返回与遥感, 2003, 2(1): 67-78.
- [2] Boies M T, Cole T D, El-Dinary A S, et al. Optical system development and performance testing of the near laser rangefinder[C]//SPIE, 1996, 2811: 169-184.
- [3] Smith D E, Zuber M T, Abshire J B. The mars observer laser altimeter investigation [C]//SPIE, State-of-the-Art Mapping, 1993, 1943: 14-18.
- [4] Wang Jianyu, Shu Rong, Huang Genghua, et al. Spaceborne laser rangefinder ranging sensitivity and accuracy analysis [C]//SPIE, 2010, 7807: 78070Y.
- [5] Kong X L, Hao P M, Zhou Sh K, et al. Study on aspherical reflecting beam expander [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(S1): 40-44. (in Chinese)
- [6] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. The Principle of Laser[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. (in Chinese)
- 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] Liao Zhibo, Wang Chunyu, Li Mengjuan. Research on computer-aided alignment based on refract optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2453-2456. (in Chinese)
- 廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透镜式光学系统计算机辅助装校技术初步研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- [8] GJB894A-99. Testing method on radiation parameters for military laser[S].China Military Standards(GJB), 1999. GJB894A-99. 军用激光器辐射参数测试方法 [S]. China Military Standards(GJB), 1999.