

卫星激光测距中发射光路光机结构设计

韩光宇^{1,2}, 张国玉¹, 曹立华^{1,2}, 陈宁², 于晓波^{1,2}

(1 长春理工大学 长春 130022; 2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 在卫星激光测距过程中,为了保证望远镜系统接收更多的能量,必须压缩出射激光光束的发散角,减小照射到卫星上的激光光斑尺寸。激光发射系统的主要作用是将激光器发出光束进行直径放大并准直,是卫星激光测距光机系统中的重要组成部分。在研制某型号卫星激光测距系统中,根据技术指标对两级扩束光学系统、机械结构以及二维电动调整机构进行了详细论述和设计。实践证明,该套系统的光学系统在进行激光光束扩束、准直的同时,通过二维电动调整机构实现了实时调整激光光束的出射方向,满足了设计指标的要求。

关键词: 扩束系统; 激光测距; 二维电动调整机构

中图分类号: TN216 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Opto-mechanical structural design of laser emitting system for SLR

Han Guangyu^{1,2}, Zhang Guoyu¹, Cao Lihua^{1,2}, Chen Ning², Yu Xiaobo^{1,2}

(1 Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In the process of satellite laser ranging, in order to ensure the telescope system absorbs much energy, the divergence angle of the outgoing laser light beam must be compressed to reduce the laser light spot on satellite. Laser light emitting system is an important part in SLR and its main function is to expand the diameter of the outgoing laser light beam and make collimation. In the development of a certain model SLR, a two-stage light beam expanding system, its mechanical structure and the two-dimension electrical adjusting mechanism are discussed in detail and designed precisely according to the technological standard. Practice proves that the optical imaging in the system works well; while doing light beam expanding and collimating, with the help of the two-dimension electrical adjusting system, the real-time adjusting of the outgoing laser light beam direction is realized, which meets the requirements of the design specification.

Key words: light beam expanding system; laser ranging; two-dimension electrical adjusting mechanism

1 引言

卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)是一种重要和实用的技术。它对于检测大陆板块移动、地壳形变、地球自转和极移、改进地球重力场和地心引力常数、精密卫星定轨、确定地球和海洋潮汐变化的规律等方面都具有重要作用。例如在地球动力学方面利用 LAGEOS 卫星

的多年全球资料,解算跟踪站地心坐标,建立高精度全球地面参考坐标系,现在全球 SLR 观测站地面站的站坐标点位精度基本上都好于 1×10 mm,最好的达到 2 ~ 3 mm;海洋学方面 TOPEX/Poseidon 卫星(联合其他空间技术)所测得全球海平面变化,其精度以达毫米级。

SLR 的原理是根据测量激光脉冲地面参考点到卫星之间的往返时间间隔,从而计算出卫星到地面参考点的距离。具体讲,首先地面跟踪站的计算机系统根据预报

准确计算出卫星的位置,通过伺服控制系统驱动望远镜跟踪卫星,激光器通过望远镜上的激光发射光路发射脉冲激光,卫星上的后向反射器将激光反射,并由望远镜接收光路接收脉冲激光,与此同时,时间间隔计数器测出激光脉冲往返时间间隔,以此时间乘以光速,即可精确地计算出卫星到地面跟踪站的距离。

由此可见,在SLR的光机系统中,激光发射光路和接收光路是其两个重要的组成部分。其中激光发射光学系统常用倒装的伽利略望远镜,其角放大率小于1,目的压缩从激光器输出的光束发散角(即准直),发散角越小,光的方向性越好,能量集中使作用距离更远。本文根据研制的某激光测距项目具体任务要求,对激光发射光路的光机结构设计进行了较为详细的论述。

2 主要技术指标

根据SLR系统中激光器分系统的主要参数及接收能量要求,激光发射光机系统需要满足下面的技术指标和性能要求。

- 1) 发射系统采用伽利略结构;
- 2) 发射光束发散角 $10''$;
- 3) 发射口径 ≤ 150 mm;
- 4) 具有光束方向调整功能;
- 5) 存储温度范围: -40 °C ~ $+60$ °C;
- 6) 工作温度范围: -35 °C ~ $+50$ °C。

3 光学系统方案设计

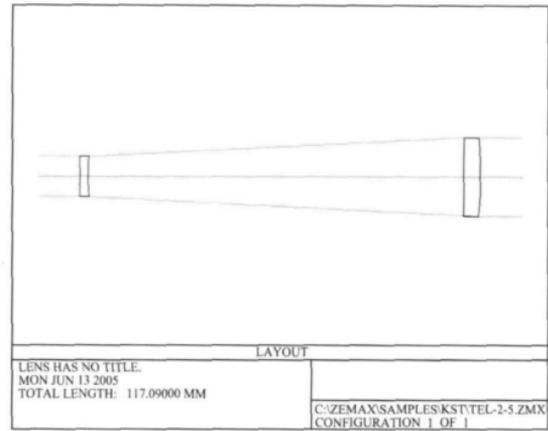
根据激光器的相关参数,发射光束直径 $\varphi 12$ mm,发散角约为 $120''$,激光器峰值功率为 5×10^9 W,峰值能量密度为 7.9×10^9 W/cm²。根据望远镜的具体结构,为降低激光在光路中各个镜组的能量密度,采用了两级扩束结构,在一级扩束和二级扩束之间采用折转方式进行光路连接,一级、二级扩束系统均采用伽利略形式。

3.1 一级扩束系统光学设计

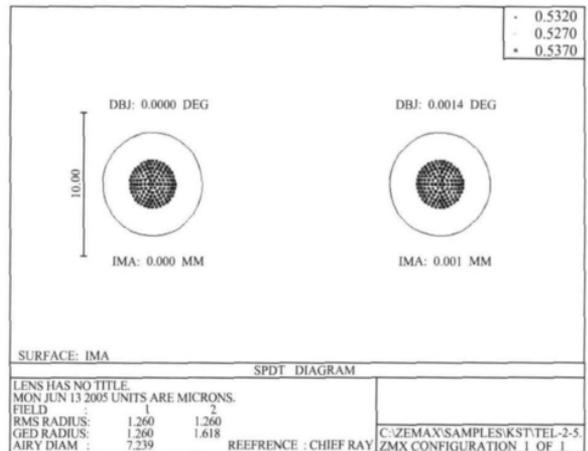
为了保证出射光束严格准直,间隔要求可调。为了降低激光光束能量对材料的影响,正、负组均采用耐高温、线膨胀系数小的材料。一级扩束系统倍率为2倍。其光学系统、光学系统的成像质量如图1所示。

3.2 二级扩束系统光学设计

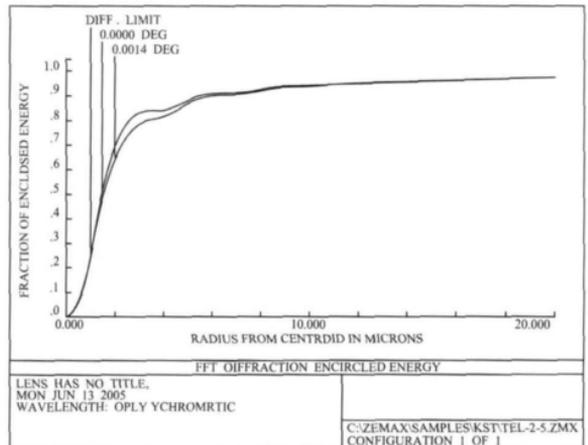
在二级扩束系统中,负透镜组的口径与相对孔径较小,采用单片即可满足使用要求;正组的口径较大,需要采用双分离的结构形式以满足使用要求。利用负透镜组残余的负球差补偿后面正透镜组的残余球差。二级扩束系统倍率为6倍。其光学系统、光学系统的成像质量如图2所示。



(a) 光学系统图
(a) Optical system layout



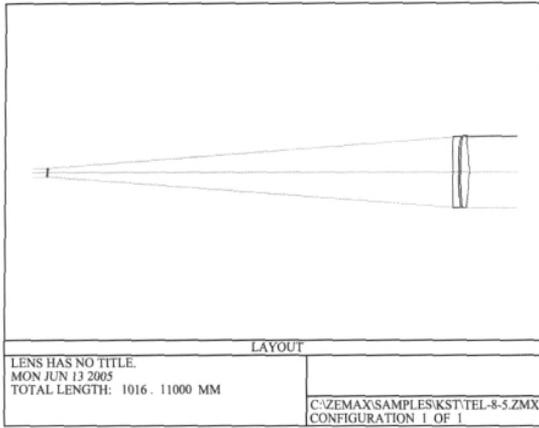
(b) 光学系统的点列图
(b) Spot diagram of the optical system



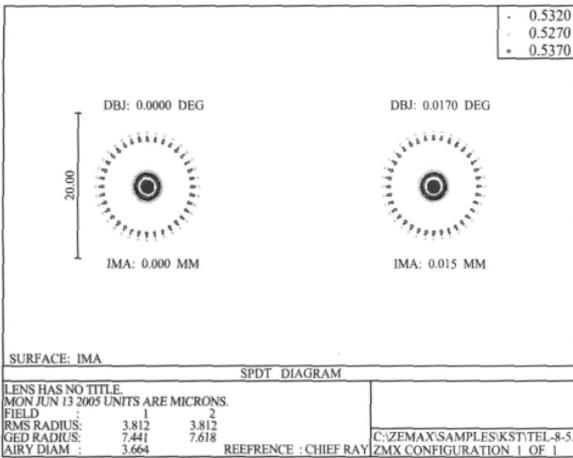
(c) 光学系统的能量集中度曲线
(c) FFT diffraction concentrated energy

图1 一级扩束系统

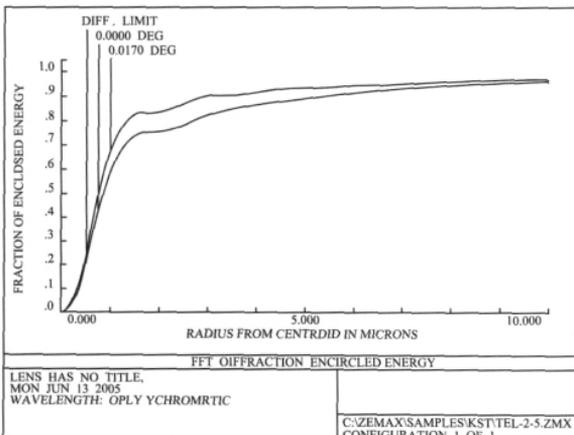
Fig. 1 First stage light beam expanding system



(a) 光学系统图
(a) Optical system layout



(b) 光学系统的点列图
(b) Spot diagram of the optical system



(c) 光学系统的能量集中度曲线
(c) FFT diffraction concentrated energy

图 2 二级扩束系统

Fig. 2 Second stage light beam expanding system

3.3 库德光路设计

为了将一级扩束系统出射的准直光束传递到二级扩束系统,需要在其间加入反射镜来进行转折,即库德光路。反射镜 45° 放置在光路中,考虑到激光光束发散角的影响,因此在光路不同位置的通光口径会略有不同。根据结构需要,共有 6 块库德反射镜(简称库德镜)。发射光学系统如图 3 所示。

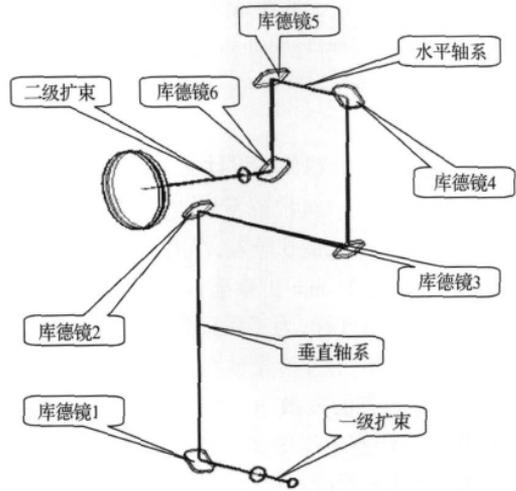


图 3 发射光学系统三维图

Fig. 3 Three-dimension diagram of the light emitting optics system

根据以上光学设计,发射光束发散角能够达到 $10''$,发射口径为 144 mm,满足技术指标要求。

4 机械结构设计

在进行发射光路机械结构设计时,首先要满足光学系统中镜片的空气间隔和排布要求,并在此基础上保证机械结构具有足够的刚度和强度,保证光学系统在调试过程中的便捷性,与整机的协调性和美观性。还要满足系统中光束方向控制的要求。

4.1 一级扩束系统光机结构设计

一级扩束系统的作用是将激光光束直径从 $\varphi 12$ mm 扩束至 $\varphi 24$ mm,并将其发散角压缩至 $60''$,同时降低了激光在折转光路中反射镜上的能量密度。一级扩束系统安装在望远镜与激光器之间,一端与激光器向连接,将激光导入发射光路;另一端通过库德镜 1 将激光光束沿着垂直轴反射进入望远镜内部中的库德镜 2。为了调整方便,将一级扩束系统与库德镜 1 组件设计到一个调整平台之上,并在调整平台上设计有三点调平机构,以此保证装调的快捷性。一级扩束系统光机结构如图 4 所示。

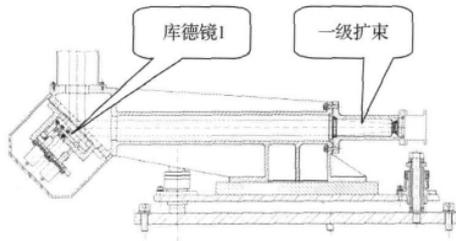


图4 一级扩束系统光机结构

Fig. 4 Opto-mechanical structure diagram of the first stage light beam expanding system

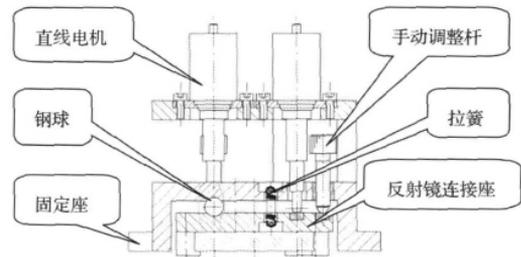


图6 二维电动调整机构

Fig. 6 Two-dimension electrical adjusting mechanism diagram

4.2 二级扩束系统光机结构设计

根据图3可知,二级扩束系统位于整个发射光路的末端,其入射光由库德镜6导入,作用是将一级扩束后的激光光束直径从 $\varphi 24\text{ mm}$ 扩束至 $\varphi 144\text{ mm}$,发散角压缩至 $10''$,然后发射向目标,为了保证发射出的激光束发散角尽量小,次镜可以沿发射光轴在 2 mm 范围内移动,进一步调整出射光束的发散角。次镜移动为电动调节形式,以便在工作状态中能够实时进行调整。二级扩束系统光机结构如图5所示。

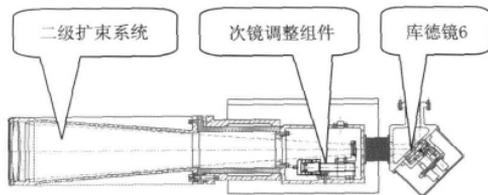


图5 二级扩束系统光机结构

Fig. 5 Opto-mechanical structure diagram of the second stage light beam expanding system

4.3 二维电动调整机构设计

在测距过程中,望远镜的接收系统对目标卫星进行捕获、跟踪,同时激光发射系统向卫星发射激光,并由接收系统接收激光回波来完成测距任务。激光发射系统固定在跟踪望远镜上并连同望远镜一起围绕垂直轴线和水平轴线运动,这就要求出射光束在望远镜工作时不能产生晃动,否则无法完成测距任务。

在发射系统光路的设计方案中,为保证发射光束不会因为望远镜围绕垂直轴线转动时发生晃动,要求库德镜1反射出光束与垂直轴线同轴;不会因为围绕水平轴线转动而发生晃动,库德镜4反射出光束与水平轴线同轴;为了解决因激光器出射光束光轴发生漂移而产生的晃动情况,需要在测距过程中实时进行调整,同时要控制出射光束方向,将库德镜1、4、6连接座均设计成如图6所示的二维电动调整机构。

二维电动调整机构由固定座、反射镜连接座、步进电机、手动调整杆、钢球和拉簧等部分组成。在固定座与反射镜连接座之间有两个相互垂直的导向块,通过直线电机或手动调整杆调节反射镜连接座以钢球为支点绕 x 轴或 y 轴方向旋转,实现发射光束的方向调整,拉簧可以在反复调整过程中消除间隙。

5 实践验证

5.1 过程检验

将装调好的一级扩束系统放置在可见光的平行光路中,通过直径 $\varphi 9\text{ mm}$ 的光阑孔后,入射光进入一级扩束系统,扩束后光束出射至另一端的白板上,并对出射光斑进行测量。经过10次测量并取其平均值,测得出射光斑直径为 $\varphi 18.12\text{ mm}$ 。扩束倍率为2.013倍。

采用相同方法对二级扩束系统进行检测,通过直径为 $\varphi 20\text{ mm}$ 的光阑孔和二级扩束系统后,测得出射光斑直径的平均值为 $\varphi 120.57\text{ mm}$ 。扩束倍率为6.0285。

从检测结果看,光学系统成像质量良好,均能够满足设计要求。

5.2 外场验证

激光发射光机结构与望远镜进行了整机集成,并与激光器系统对接调整完成后,在外场分别对低轨、中轨目标卫星进行测距,成功完成了对GPS、Compass和Etalon等卫星的测距任务。在任务执行过程中,通过控制指令对二维电动机构进行调整,在 5 s 内能成功的实现对发射光束的调整,完全能够满足系统的指标要求。

6 结论

根据工程的技术指标和性能要求,重点对一级、二级扩束光学系统和二维电动调整机构进行了较为详细的设计与分析。采用两级激光扩束系统来实现对激光发散角的压缩,不仅能降低激光在折转光路中反射镜上的能量密度,而且也降低了发射光路的加工难度;解决了由于激

光器光束漂移带来的发射光束晃动问题。

参考文献

- [1] 赵学颜,李迎春.靶场光学测量[M].北京:装备指挥技术学院.2001.
ZHAO X Y,LI Y CH. Optical measure at shooting range [M]. Beijing: National Defense Press 2001.
- [2] 赵赞,潘峰,王茂磊,等.一种应用于卫星导航定位系统的SLR系统架构与实现[J].激光与红外.2010,40(3):241-245.
ZHAO Y,PAN F,WANG M L,et al. SLR system framework and design based on satellite navigation position system[J]. Laser & Infrared. 2010,40(3):241-245.
- [3] 江洁,王昊予,张广军,等.一种大视场姿态角传感器的光学系统设计[J].仪器仪表学报.2010,31(1):68-72.
JIANG J,WANG H Y,ZHANG G J,et al. Optical system design for large FOV attitude angle sensor [J]. Chinese journal of Scientific Instrument. 2010,31(1):68-72.
- [4] 王小庆,高云国,谭启檐.激光扩束器物镜微调机构设计[J].机械传动.2010,34(5):31-33.
WANG X Q,GAO Y G,TAN Q Y. Design of the fine adjustment mechanism for objective of the laser beam expander [J]. Journal of Mechanical Transmission. 2010,34(5):31-33.
- [5] 郎琪,邹昕,王文生.折反式坦克目标跟踪识别红外光学系统设计[J].仪器仪表学报.2009,30(3):575-579.
LANG Q,ZOU X,WANG W SH. Design of catadioptric infrared optical system for tank target tracking and recognition [J]. Chinese journal of Scientific Instrument. 2009,30(3):575-579.
- [6] 安源,齐迎春.空间相机直线调焦机构的设计[J].光学精密工程.2009,17(3):609-614.
AN Y,QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera [J]. Optics and Precision Engineering. 2009,17(3):609-614.
- [7] 赵春梅,瞿锋,程鹏飞,等.阿根廷圣胡安激光测距系统的SLR数据质量分析[J].测绘学报.2008,37(3):338-341.
ZHAO CH M,QU F,CHENG P F,et al. Data quality analysis of Argentina San Juan laser ranging system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2008,37(3):338-341.
- [8] 约德.光机系统设计[M].北京:机械工业出版社.2008.
YODER JR P R. Opto-mechanical systems design [M]. Beijing: China machine press. 2008.
- [9] 张国玉,张帆,徐熙平,等.小型准直式红外地球模拟器研究[J].仪器仪表学报.2007,28(3):545-549.
ZHANG G Y,ZHANG F,XU X P,et al. Research on a miniature collimating infrared earth simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2007,28(3):545-549.
- [10] 黄林昊,廖学兵,谢正喜,等.激光光束质量对远程激光测距精度影响研究[J].仪器仪表学报.2006,27(6):1219-1221.
HUANG L H,LIAO X B,XIE ZH X,et al. Study on the influence of the laser beam quality on the precision of long-range laser ranging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2006,27(6):1219-1221.
- [11] 严奉轩,郭唐永,王培源,等.SLR应用展望-伽利略计划和非合作目标跟踪[J].大地测量与地球动力学.2006,26(3):118-121.
YAN F X,GUO T Y,WANG P Y,et al. Prospect of application of SLR-on Galileo plan and debris tracking [J]. 2006,26(3):118-121.
- [12] 徐灏,邱宣怀.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社.1992.
XU H,QIU X H. Machine design hand book [M]. Beijing: Publishing House of Mechanical Industry, 1992.
- [13] 高皓,刘清华,赵赞,等.卫星激光测距系统控制分系统设计及实现方法[J].现代导航.2010,3:7-10.
GAO H,LIU Q H,ZHAO Y,et al. Design and implementation method of main control system in Satellite Laser [J]. Modern Navigation. 2010,3:7-10.
- [14] 孙芳方,陈宁,乔彦峰.光电经纬仪中激光测距装置光学系统设计[J].半导体光电.2007,28(6):878-880.
SUN F F,CHEN N,QIAO Y F. Optical design of emitting device of laser range on electro-optical theodolite [J]. Semiconductor Optoelectronics. 2007,28(6):878-880.
- [15] 项清革,卫志斌,程伯辉,等.卫星激光测距仪发散角系统的设计[J].测绘科学.2004,29(5):44-46.
XIANG Q G,WEI ZH B,CHENG B H,et al. Design of Divergence system of Satellite Laser Ranging [J]. Science of Surveying and Mapping. 2004,29(5):44-46.

作者简介



韩光宇,1995年于长春大学毕业,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为光学精密机械设计。

E-mail: hanlamost@163.com

Han Guangyu graduated from Changchun University in 1995. He received his M. Sc. degree from Changchun Insti-

tute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences in 2004. He is currently an associate research fellow in Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics. His main research focuses on the design and study of optics and fine mechanics.



张国玉, 1984 年于长春理工大学获得学士学位, 1990 年于长春理工大学获得硕士学位, 2005 年于长春理工大学获得博士学位。现为长春理工大学教授, 主要研究方向光电仪器与检测技术。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

Zhang Guoyu received B. Sc. in 1984 , M. Sc. in 1990 and Ph. D. in 2005 all from Changchun University of Science & Technology. He is currently a professor in Changchun University of Science & Technology. His main research focuses on opto-electrical instruments and testing technology.