

文章编号:1001-5078(2020)11-1303-05

· 激光应用技术 ·

一种新的激光发射系统准直方法

刘琳^{1,2}, 李春娜², 李林¹, 王岳²

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 激光发射系统包含多个光通道和传感器, 还具有非常高的能量和异常波长。因此, 传统的轴系调试方法非常复杂, 而且精度不高。传统方法对实际光路进行调试, 还存在人员安全的问题。本文提出了一种基于自准直法的新方法, 建立了新的光学辅助调试光路, 利用高精度自准直数显设备, 对系统光学进行调试, 解决了人员安全和高精度的问题。文章对该方法进行仿真和实验。最后, 对激光发射系统的精度和误差合成进行了分析和比较, 新方法能将传统方法 15 mrad 的调轴精度提高至 3 mrad, 分析结果表明, 新方法具有安全高效且精度高的优点。

关键词: 激光准直; 光轴调试; 精度分析; 激光发射系统

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.11.003

Novel method of alignment for high-energy laser launching system

LIU Lin^{1,2}, LI Chun-na², LI Lin¹, WANG Yue²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The conventional method of alignment for the laser launching system is complicated and low precision, because the system contains several optical channels and interlaced dimensions. In the high-energy laser launching system, the laser has the very high energy and abnormal wavelength in addition. That is, the alignment method is limited to cases of human safety due to the personnel participation in tool commissioning and the higher accuracy for the laser multiplier. In this paper, a new method based on the auto-collimation method to solve the questions of human safety and high accuracy is proposed. In this method, a novel optical model used assistant optical path is built. To verify this method, simulations and experiment are performed. In the end, the precision impression and error compound of the laser launching system are analyzed and compared. The analysis results show that the aiming precision can reach 10" without human in the light path, which is only 1' when using the conventional method.

Keywords: laser collimation; optical axis adjustment; precision analysis; laser launching system

1 引言

在激光发射系统中, 高能激光需要持续瞄准目标数秒钟, 因此, 发射系统在对目标进行跟踪和瞄

准时, 必须具有较高的瞄准精度^[1]。在光电系统中实现高精度的跟踪瞄准是一个具有挑战性的问题, 因为光学系统光轴很长, 同时目标是移动的^[2]。此外, 强

作者简介: 刘琳(1982-), 女, 博士, 高工, 主要从事红外光学系统的总体设计和分系统设计, 熟悉光学系统的公差分析, 系统检测及热光学分析。E-mail: xiaolinzi1982ll@126.com

收稿日期: 2019-12-12

激光的波长较长,常规 CCD 是接收不到的^[3]。为了使光轴精度达到微米级的量级,传统的对准方法通常需要复杂的工具,且校准精度不高。本文提出了一种适用于这种情况的新的解决方案。采用辅助光源和参考镜准直方法,以最少的辅助工具和测试设备完成了系统的光轴调整。该方法具有以下优点:(1)采用辅助光源,避免高能激光对人体造成伤害;(2)调试光路简单易操作;(3)基于 CCD 的检测方法,可以提高系统装调精度。该方法不仅适用于室内调试,而且适用于外场对设备进行快速检测和校准。

2 系统结构

2.1 激光发射系统的组成

高能激光发射系统具备光束定向发射和跟踪瞄准的功能。由光束控制和发射系统、高能激光、可见光监视和控制系统组成,如图 1 所示。高能激光由高能激光器提供。可见光监视系统由长焦镜头和 CCD 组成,用来对物空间成像。控制系统通过目标信息的反馈,控制软件调制跟踪精度。光束控制和发射系统由跟瞄转台带动一个大口径的离轴反射光学系统构成。跟瞄转台由方位旋转和俯仰旋转组件构成。高能激光发射系统工作时必须使高度集中的能量会聚并持续照射在目标固定点上。因此,系统的跟踪瞄准系统必须具备极高的瞄准精度。往往需要微弧度量级。为了达到这个目标,激光发射系统需要将精度分解在不同组件以及每个组件的配合精度上。

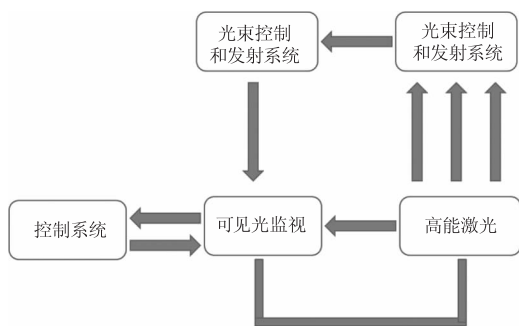


图 1 高能激光发射系统的组成

Fig. 1 Composition of high energy laser launching system

2.2 光学系统组成

高能激光发射系统的光学部分集中于系统的光束控制和发射系统上,由 3 个组件组成。分别是轴系传输光学、发射望远镜和监视光学。如图 2 所示。1 是轴系传输光学,安装在跟踪瞄准转台下方,不随轴系旋转运动;;2 是发射望远镜,由离轴抛物面镜

组成,绕转台轴系进行方位和俯仰旋转;3 为监视光学,包括精跟踪可见镜头和监视镜头,同轴系传输光学一样不随轴系进行旋转运动。高能激光由激光器出射,经轴系传输光学和发射望远镜出射,聚焦在远距离的目标上;同时,目标能量经过系统会聚到监视镜头 CCD 上。

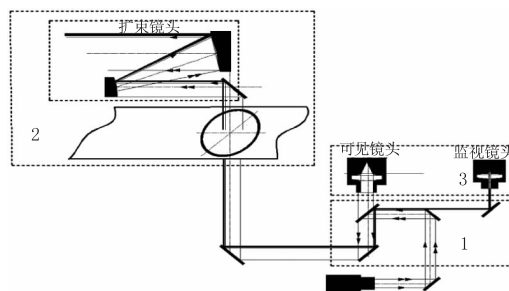


图 2 高能激光发射系统的光学组成

Fig. 2 Optical composition of high energy laser launching system

3 装调方法及步骤

3.1 装调原则与精度分解

高能激光发射系统的装调原则是保证高能激光光束始终沿发射系统的光路发射出去。即当目标进入系统时,光轴在方位和俯仰机械轴旋转时始终瞄准目标。由于轴系加工误差、光机配合误差、光机装调误差、测试误差等,靠硬件直接装配达到微弧度的光轴精度,是不可能实现的。需要后期进行光轴补偿。采用闭环反馈控制补偿的方法进行,即通过实时测量光轴偏移量,采用两维高精度微结构根据数据反馈进行调整补偿。从而达到高精度的系统精度。两维高精度补偿微结构的行程小、精度高,因此,系统硬件装配的稳定精度也要首先保证毫弧度的角度偏差。系统精度分配和调试目标都是将误差控制在 3 mrad 以内。

采用自上而下的原则根据系统精度要求分解出影响系统精度的因素。对不同因素进行设计和调试,最后综合各个因素的误差,分析系统是否达到精度指标要求。影响系统精度的因素有很多,本文在这节只介绍光机装调的方法和步骤,在下一节对主要误差做精度分析。

工艺设计通过合理分配每个零部件的加工精度、设计正确的装配基准以及安排易操作的调试步骤,使系统的方位和俯仰两维的光学轴和机械轴在旋转时基本保持一致。即保证目标在进行两维高精度微结构反馈补偿之前,系统能满足微调结构对系统的精度要求。

3.2 装调步骤

3.2.1 轴系传输光路装调

激光武器发射的光波能量强,波长长,不能用普通 CCD 接收。本系统在装调时采用 DPLL 绿光激光器代替高能激光,由调试切换镜切换进调试光路,再由普通 CCD 进行监测和调试。避免了直接采用高能激光进行装调的危险,同时将监测结果可视化,提高了装调精度。

装调的主要思想是采用激光自准直法测量系统的偏角。再根据偏角判断光机系统的调试方向,将需要调整的光机组件调整至系统光轴中心。该方法简单易行,只要能保证测量物体与接收器之间的距离,就能获得足够高的测量精度。自准直法测量辅助工装为一个平面反射镜,具有两维度可调可锁紧的安装结构。调试时,将方位轴系和俯仰轴系作为两个组件单独进行。装调方法如下。

(1) 方位轴系装调

a) DPLL 绿光激光器代替高能激光,由激光切换镜切换进调试光路;

b) 通过精电视 CCD 监视方位参考镜返回的反射光斑。用手缓慢转动方位轴,则光斑在监视器屏幕上做圆周运动,不断调整方位参考镜上的调整螺钉,使光斑运动的圆周直径最小。

测量光斑运动轨迹的直径,为方位轴系的跳动量 δ_1 。如图 3 所示。

c) 紧固方位参考镜,使之位置相对光路固定,做标记。在调试过程中,方位参考镜不再调整,重新安装均以标记为准,装至原始位置。

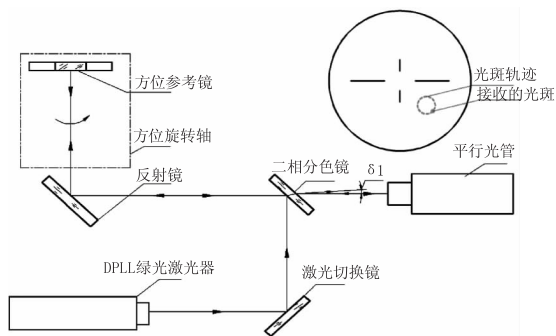


图 3 方位轴系装调光路

Fig. 3 Installation and dimming of azimuth shafting

(2) 方位旋转轴与精跟踪可见光学的光轴一致性调试

a) 撤离系统的 45 度转折镜 1, 放置自准直平行光管。

b) 自准直平行光管出射平行光, 经参考镜 1 反射, 其反射光斑可通过自准直平行光管和监视光学 CCD 接收。调整自准直平行光管, 使目镜中的反射像位于视场中心。如图 4 所示。

c) 微调监视光学 CCD, 使其显示的反射像位于 CCD 视场中心。固定监视光学 CCD。

d) 撤掉自准直平行光管。恢复系统光路。

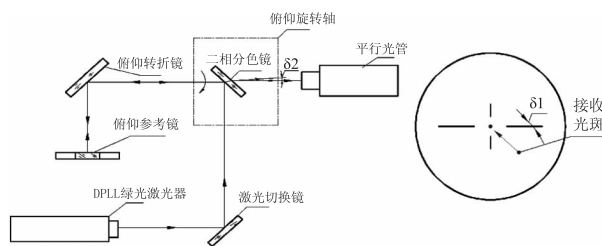


图 4 方位旋转轴与监视光学的光轴一致性调试光路

Fig. 4 Alignment adjustment optical path of azimuth rotation axis and monitoring optical axis

(3) 俯仰轴系装调

自准直仪出射的平行光经方位反射镜反射, 沿原光路反射回自准直仪。用手缓慢转动俯仰轴, 则光斑在接收视场内做圆周运动。

不断调整方位反射镜上的调整螺钉, 使光斑运动的圆周直径最小。

测量光斑运动轨迹的直径, 为俯仰轴系的跳动量 δ_2 。如图 5 所示。

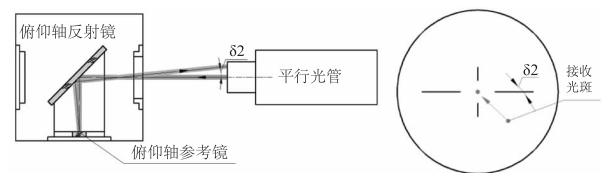


图 5 俯仰轴系装调光路

Fig. 5 Installation and dimming of pitch shafting

3.2.2 激光光束监测系统光路装调

撤掉 DPLL 绿光激光器和切换镜, 将高能激光的功率调制 1 W 出射。使得高能激光传输至方位参考镜, 经方位参考镜反射, 反射光束沿原光路返回, 由精跟踪可见 CCD 接收。接收光斑虽然很弱, 仍然可在 CCD 上形成一个光斑, 移动激光器, 将光斑调制可见 CCD 中心。使得高能激光与精跟踪视轴共轴。如图 6 所示。

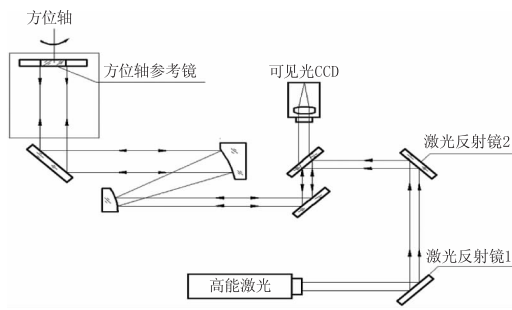


图 6 激光光束监测系统光路装调

Fig. 6 Optical path adjustment of laser beam monitoring system

4 结果与分析

根据激光发射系统和光机的装调步骤,对激光光束经转台出射后方位和俯仰的调试精度进行分析。

其中,可见光精跟踪视轴和高能激光出射光轴之间的平行度误差是整个激光发射系统的关键,以此作为分析总目标项。根据两维高精度微结构的性能要求,光轴平行度误差应该控制在 3 mrad 以内。

光轴装调的精度主要包括光机系统零件加工误差和综合误差。光机系统误差分为方位和俯仰机械轴系加工误差和光学装配误差。综合误差包括 CCD 测量精度,自准直仪测量误差和人眼判读误差^[1]。

在进行误差合成时,认为各误差项相互独立。列出表 1 对系统误差的来源、分布和标准偏差的大小做出说明。

表 1 系统误差的来源、分布和标准偏差的大小

Tab. 1 The source, distribution and standard deviation of the system error

序号	类型	误差来源	误差分布	标准偏差/mrad
1	方位轴机械加工	方位转台轴跳动量	均匀分布	0.4
2		基准垂直度	均匀分布	0.1
3	方位轴光机装调	辅助光与基准的平行度误差	均匀分布	0.25
4	俯仰轴机械加工	俯仰转台轴跳动量	均匀分布	0.3
5		同轴度误差	均匀分布	0.12
6	俯仰轴光机装调	辅助光与基准的平行度误差	均匀分布	0.25
7	综合误差	CCD 测量误差	正态分布	0.3
8		人眼判读误差	正态分布	0.3
9		自准直仪测量误差	正态分布	0.1
10		高能激光与辅助光平行度误差	正态分布	0.22

4.1 计算

方位轴系误差:影响方位轴系误差的误差项有 1,2,3,7,8,9,10。方位轴系光轴平行度装调误差的标准偏差合成成为:

$$\sigma_{\text{azimuth}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sum_{i=7}^{10} \sigma_i^2} = 0.69 \text{ mrad} \quad (1)$$

俯仰轴系误差:影响俯仰轴系误差的误差项有 4,5,6,7,8,9,10。俯仰轴系光轴平行度装调误差的标准偏差合成成为:

$$\sigma_{\text{pitching}} = \sqrt{\sum_{i=4}^{10} \sigma_i^2} = 0.64 \text{ mard} \quad (2)$$

$$\text{系统光轴平行度误差: } \sigma_{\text{system}} = \sqrt{\sigma_{\text{azimuth}}^2 + \sigma_{\text{pitching}}^2} = 0.94 \text{ mard} \quad (3)$$

从以上的误差分析可以看出,光轴平行装调误差的标准偏差 σ_{system} 为 0.94 mrad,把它视为正态分

布,则 $\Delta_{\text{system}} = 3 \sigma_{\text{system}} = 2.82 \text{ mrad}$ 。

4.2 分析

为保证更高系统精度的需求,根据使用环境,分析系统误差的各项因素,采用以下技术途径来提高系统精度。

辅助光与基准的平行度误差由下式计算:

$$\Delta = \arctan\left(\frac{\sqrt{2n\alpha}}{f'}\right) \cdot \pi/180 \quad (4)$$

其中, n 是像元数; α 是像元尺寸; $\pi/180$ 是弧度与角秒的转化系数; f' 为会聚镜头的焦距。可见,可以通过提高会聚镜头的焦距或者缩小像元尺寸、增多像元数量,来提高辅助光与基准的平行度误差的精度^[4]。

方位和俯仰机械加工的精度往往关乎成本预算,高精度的同时意味着高昂的加工成本。因此,机

械加工精度的提高要充分考虑系统的综合性价比。

CCD 和自准直仪的测量误差是产品本身的制造误差,可以通过购买使用更高精度的测量设备来提高。

5 结 论

针对高能激光发射系统的光轴对准问题,提出了一种新的对准方法,该方法具有较高的瞄准精度。这种方法为构建高质量的光学对准系统提供了一种更简单、更经济、更高精度的方法。通过理论分析与精度计算,验证该方法达到了毫弧度的精度量级,用以提供给后续微动补偿机构,形成闭环,使整个系统达到微弧度精度。除了辅助光能避免人员在调试过程中受到伤害而外,参考镜准直系统成本更低、操作更为便捷,具有可进行外场调试的优点。在车载激光高能发射系统中经过试验验证,系统硬件装调达到了 3 mrad 的精度,经过微调系统的补偿,最终系统达到了 10 μ rad 的瞄准精度。

参考文献:

- [1] Shi Yali, Gao Yunguo, Deng Weijie. Novel method of beam monitoring and alignment for high-energy laser

launching system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 29–33. (in Chinese)

史亚莉,高云国,邓伟杰. 高能激光发射系统光束监测与装调的新方法[J]. 光电工程, 2008, 35(2): 29–33.

- [2] Jiang Feng, Bai Bo, Zhang Jinliang, et al. Integration technology of stabilized electro-optical sight system[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 156–158. (in Chinese)

姜峰,白波,张锦亮,等. 光电稳瞄系统装调的关键技术[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 156–158.

- [3] Du Geguo, Bai Yonggang. Improvement of the experiment-adjustment and measurement of He-Ne Laser[J]. Journal of Electrical and Electronic Education, 2009, 31(9): 102–104. (in Chinese)

杜戈果,白永刚. “He-Ne 激光器的装调与参数测试”实验的改进[J]. 电气电子教学学报, 2009, 31(9): 102–104.

- [4] Zuo Xiaozhou, Shen Liangji, Yang Haicheng, et al. Alignment technology of catadioptric linear array LWIR sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 82–87. (in Chinese)

左晓舟,沈良吉,杨海成,等. 折反式长波线阵红外传感器装调技术[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 82–87.