

文章编号：1003-501X(2008)02-0029-05

高能激光发射系统光束监测与装调的新方法

史亚莉^{1,2}, 高云国¹, 邓伟杰^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要：高能激光束能量高，波长较长，无法用常规的光电探测器进行接收。为了实现高能激光发射系统中激光束的监测和系统的快速高精度装调，采用间接测量的方法，将激光束的监测转换为激光谐振腔出射镜的监测，并且通过使用光路切换镜，用 He-Ne 激光束代替高能激光束来完成整个系统的装调。对光束监测系统、装调辅助系统、靶标镜以及光路切换镜等辅助设备的工作原理和使用方法做了简单的介绍。为考察方法的有效性，结合 CO₂ 激光发射系统进行了精度分析。结果表明，使用本方法装调后，光轴平行度误差可达到 15.9"，满足设计指标的 20"。

关键词：高能激光发射系统；光束监测；装调；精度分析；激光器

中图分类号：TH744.5

文献标志码：A

Novel Method of Beam Monitoring and Alignment for High-energy Laser Launching System

SHI Ya-li^{1,2}, GAO Yun-guo¹, DENG Wei-jie^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The conventional photoelectric detector can not get the laser signal because of the laser's high energy and long wavelength. To achieve the goal of real-time monitoring the laser beam and fast aligning the high-energy laser launching system accurately, we monitored the output mirror of laser resonator to supersede the laser beam in this paper. In the same way, with a right-angle reflector, the launching system was aligned using the He-Ne laser of beam monitoring system instead of high-energy laser. In the end, the precision of the CO₂ laser launching system was analyzed to inspect the method. The analysis results show that the parallelism errors can reach 15.9", which satisfies the requirement of system.

Key words: high-energy laser launching system; beam monitoring; alignment; precision analysis; laser

1 引言

高能激光发射系统技术难度大，研制周期长，并有一定风险。要研制出实用有效的高能激光发射系统，需解决的关键技术问题还很多，激光束的监测和系统的装调就是其中之一，它是决定从激光发射结构出射的激光束能否准确且持续稳定地照射在目标上的重要因素。装调可以使系统在最接近设计的状态下工作，通过对光束的动态监测，实时检测光束的角度偏移并用快速二维可控微调反射镜对其进行补偿，有效抑制了激光束的角漂移^[1]。

因为大多数高能激光束的波长比较长，而且能量高，以 CO₂ 激光发射系统为例，波长为 10.6μm，功率可达万瓦，所以无法用常规的光电探测器，如 CCD 等进行接收，这就使得对高能激光发射系统的光束进行直接监测和对整个系统直接进行装调非常不容易实现。

本文采用间接测量^[2]的方法，设计了一个光束监测系统，通过对激光谐振腔出射镜的倾斜角度进行监

收稿日期：2007-05-29；收到修改稿日期：2007-10-06

基金项目：国防科工委资助项目

作者简介：史亚莉(1982-)，女(汉族)，山西运城人，博士研究生，主要研究高能激光发射系统的对准技术。E-mail: shiyali_825@126.com

测, 获得高能激光束的角度偏移量。在对整个系统进行装调时, 使用了一个光路切换镜, 将 He-Ne 激光束切换进发射光路, 从而用 He-Ne 激光束代替高能激光束来完成整个系统的装调。间接测量方法的使用, 降低了高能激光发射系统对光束监测和装调所使用的光学元件、电子器件的要求, 而且避免了装调时高能激光束对人员或光机电结构造成的损伤, 在提高精度的同时降低了成本。最后, 对 CO₂ 激光发射系统的光束监测与装调的精度进行了误差分析, 分析结果表明, 使用本方法装调后, 两光轴平行度误差可达到 15.9", 满足设计指标的 20"。本方法的优点是光路简单、装调方便。不仅适用于系统出厂前的初始装调, 而且可以实现系统出厂后特别是外场使用时的快速装调, 解决了发射系统出现精度问题后都必须返回生产单位, 用专用设备进行检测和校正的问题。光束监测系统除了对高能激光束进行动态监测外, 还参与了整个系统的装调, 提高了设备的利用率。

2 系统组成

高能激光发射系统主要由光学平台与能源辅助系统、高能激光器、精密瞄准跟踪系统和光束控制发射系统组成。高能激光器是系统的核心, 它用来产生高光束质量的高能激光束。精密瞄准跟踪系统对目标进行捕获、跟踪、瞄准并引导光束控制发射系统使发射望远镜准确地对准目标。由于高能激光发射系统是靠激光束直接发射到目标并稳定地停留一段时间而产生作用的, 因而对跟踪发射的反应速度和精度要求很高。光束控制发射系统的作用是根据跟踪测量系统提供的目标、方位、距离等数据, 将激光束扩展到较大口径快速、准确地发射出去。精密瞄准跟踪系统和光束控制发射系统一般安装在同一跟踪架上, 统称为跟踪发射系统。另外, 激光系统需要安放在一个稳定的光学平台上, 无论是放在地面还是车载, 都要提供一个保证光学系统稳定工作实现精确跟踪瞄准的稳定光学平台, 还需要有为全系统提供能源和运行的辅助设备^[3]。

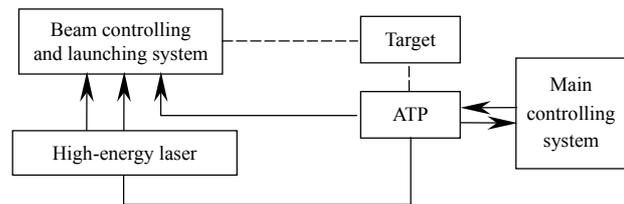


图 1 高能激光发射系统组成

Fig.1 High-energy laser launching system

光束监测是指对从激光谐振腔出射镜出射的激光束的方向进行的实时检测。这是由于为了达到减震的目的, 高能激光器和平台之间一般采用非刚性连接, 这样就造成高能激光器容易受外界因素的影响, 导致进入跟踪发射系统前的激光束产生微小的角度偏移, 所以为了保证跟踪发射系统和高能激光器之间的精密对准, 且在动态跟踪过程中保持高的对准稳定性, 达到角秒级, 设计了一个激光束监测系统, 该系统可实现动态监测激光束的角度偏移量, 为后续光路中的快速两维可控微调反射镜提供补偿量。

3 光束监测

高能激光束的波长比较长, 常规的光电探测器满足不了接收要求, 考虑到激光束总是垂直于谐振腔镜出射, 所以通过监测谐振腔镜的倾斜角度来间接监测激光束的角度偏移量是可行的。

动态测量小角度的方法^[4]很多, 有圆光栅测角法、自准直法、全内反射差动探测法、干涉测量法等。其中激光自准直法是以激光束投射到被测物体上, 通过入射与反射光束间的横向位移变化量来测得物体的转动微角度。结合对准精度和结构大小以及成本的要求, 光束监测系统决定采用激光自准直法。自准直法简单、易行, 只要被测量物体与探测器之间的距离适当, 可获得很高的测量精度和分辨率。

光束监测系统^[5-7]如图 2 所示, 系统主要

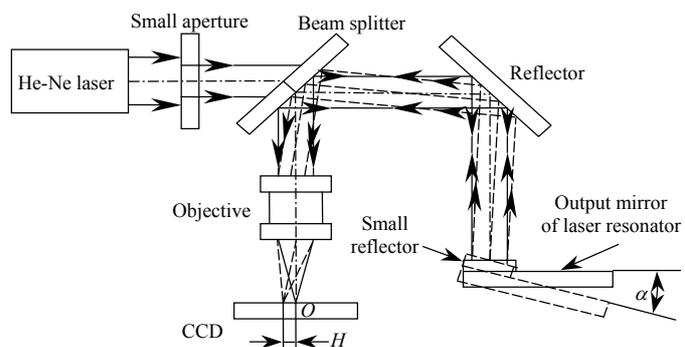


图 2 光束监测系统

Fig.2 Laser beam monitoring system

由波长为 $0.632\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器、小孔光阑、分束镜、反射镜、小反射镜、会聚镜头和 CCD 接收器组成。系统工作原理：在激光谐振腔出射镜的边缘安装一块小反射镜，小反射镜的法线与谐振腔出射镜的法线平行，调节光路中的分束镜和反射镜使得从 He-Ne 激光器发出的激光经小反射镜反射后，光斑位于 CCD 光束位置传感器中心，以此作为原点 O 。这样，当高能激光束发生 α 角度偏移时，小反射镜和谐振腔出射镜就会产生 α 角度的倾斜，从小反射镜反射回来的光束将发生 2α 角度的变化量，成像在 CCD 靶面上，其光点中心距原点距离为 H ，通过图像处理和 CCD 像元计数求出 H ，代入公式 $\alpha = (1/2)\arctan(H/f')$ (f' 为聚光镜头焦距)，便可以求出激光束的偏移量 α 。

4 系统装调

高能激光发射系统的装调主要包括发射光路装调和光轴平行装调。发射光路装调的目的是为了保证高能激光束始终沿发射光路中心发射出去，这是由于当高能激光束偏离发射光路中心时，出射光束的质量会下降，光束偏离还会使光路中的机械结构因为热辐射而产生热变形，增加了系统的误差。光轴平行装调是指激光发射光路和红外/可见探测器视轴之间的平行度装调，这是保证高能激光束沿跟踪测量轴精确地发射到跟踪目标上的关键。

4.1 发射光路装调

发射光路主要由扩束光路和库德光路组成，装调方法如图 3 所示。在装调发射光路时，首先，应保证激光谐振腔镜上固定的小反射镜法线方向代表高能激光束方向；其次，应保证光束监测光路已调好。当以上两个条件满足时，把光路切换镜和靶标镜切换到工作位置，用 He-Ne 激光器发出的激光束代替高能激光器的光束来装调发射光路，调整库德光路和扩束光路中反射镜的位置，使在转动垂直轴和水平轴的时候，激光光斑始终位于靶标镜的中心，从而保证了高能激光束始终从窗口镜中心发射出去。

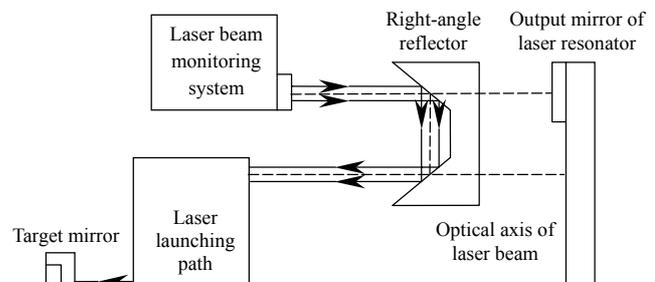


图 3 发射光路装调示意图

Fig.3 Alignment of laser launching path

这种装调方法克服了高能激光不可见的弱点，用靶标镜代替了以前的热敏纸，提高了装调精度。靶标镜和发射光路的窗口镜具有互换性，使用时可快速换上。光路切换镜相当于一个 90° 反射镜，工作时切进光路，不工作时切出。

4.2 光轴平行装调

为了完成光轴平行装调，专门设计了一个装调辅助系统^[8]，它和前面提到的靶标镜、窗口镜也是可以互换的，系统应用了折反射式平行光管的原理，目的在于产生两束不同波段平行光 A 和 B 的同时，可以有效减小体积和减轻重量。装调辅助系统如图 4 所示。

在激光发射光路调好后，去掉靶标镜，将装调辅助系统安装好，先通过调节装调辅助系统的微调螺钉，

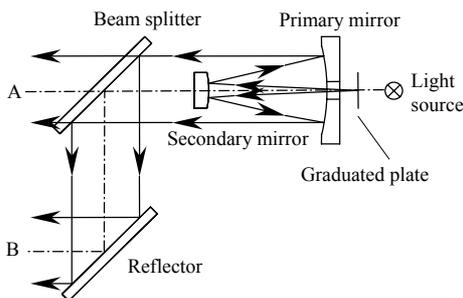


图 4 装调辅助系统光学图

Fig.4 Assistant system for alignment

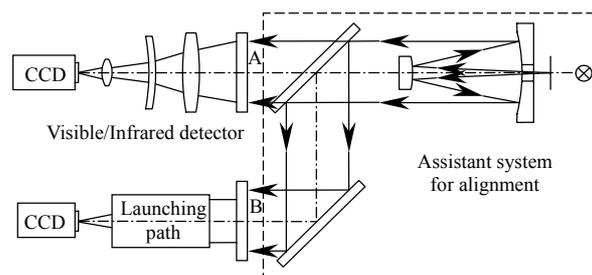


图 5 光轴平行装调示意图

Fig.5 Alignment of two optical axis parallelism

使得通过激光发射光路的平行光 B 成像于光束监测系统中的 CCD 中心, 此时证明从装调辅助系统发出的两束平行光 A 和 B 平行于上一步已经装调好的激光发射光路。然后再调节可见/红外探测器的光路, 当通过可见/红外探测器光路的平行光 A 成像于可见/红外探测器 CCD 中心时, 证明该光电探测器的视轴和激光发射光轴平行。用同样的方法可装调其它光电探测器视轴和激光发射光路的平行。

5 精度分析

结合 CO₂ 激光发射系统的具体参数分别对光束监测和装调的精度进行分析。影响精度的因素很多, 这里只对主要因素进行保精度估计。其中光电探测器视轴与激光发射光轴之间的平行度装调精度是整个激光发射系统保精度工作的关键指标, 将作为分析的重点。根据设计指标, 光轴平行度误差应控制在 20" 以内。

光束监测和装调的精度主要由光机系统精度和电子学系统精度两部分组成。光机系统精度主要受机械加工、光学件加工及装配精度的影响。电子学系统精度主要受 CCD 测量精度和图像判读精度的影响。在分析时必须对数据归类, 主要将数据归为以下两类, 均匀分布和正态分布。CCD 的测量误差和图像判读误差可视为均匀分布, 机械和光学调整制造等各项误差都视为正态分布^[9]。当误差服从正态分布时, $\sigma = \Delta/3$ (Δ 表示误差, σ 表示相应的标准偏差); 当误差服从均匀分布时, $\sigma = \Delta/\sqrt{3}$ 。在对误差进行合成时, 不考虑扩束结构对误差的缩小, 认为各项误差相互独立, 并且对总误差的贡献相同, 各误差传递系数(即权重)均为 1, 相关系数均为 0。表 1 列出了主要误差项的来源、分布形式和标准偏差的大小。

表 1 各误差项的分布形式和大小

Table 1 Distribution types and values of error items

Number	Error items	Distribution types	Standard deviation
1	Normal parallelism error between small reflector and output mirror	Normal distribution	$\sigma_1=1.7''$
2	Measurement error of beam monitoring system	Uniform distribution	$\sigma_2=1.0''$
3	Parallelism error between incident light and output light of right-angle reflector	Normal distribution	$\sigma_3=1.7''$
4	Optomechanical system error of laser launching path	Normal distribution	$\sigma_4=3.3''$
5	Reading error of spot center on target mirror	Uniform distribution	$\sigma_5=3.4''$
6	CCD measurement error and image reading error in beam monitoring system	Uniform distribution	$\sigma_6=2.0''$
7	Parallelism error of tow output light beams from assistant system	Normal distribution	$\sigma_7=0.67''$
8	Optomechanical system error of visible/infrared detector	Normal distribution	$\sigma_8=0.5''$
9	CCD measurement error and image reading error in visible/infrared detector	Uniform distribution	$\sigma_9=2.5''$

5.1 光束监测误差分析

影响光束监测误差的因素主要有误差项 1 和误差项 2。第 1 项误差 $\Delta_1 = 5''$, 为设计要求指标; 因为光束监测系统组件在使用前已装调好, 组件中的所有光学和机械零件的位置都已固定并且在使用时不动, 所以在分析误差项 2 时, 光机系统误差可以忽略, 主要考虑 CCD 的测量误差 Δ_{21} 和利用重心法求光斑位置的误差 Δ_{22} 。式(1)给出了 Δ_{21} 和 Δ_{22} 的计算公式:

$$\Delta = \arctan(\sqrt{2}na\rho''/f') \approx \sqrt{2}na\rho''/f' \quad (1)$$

式中: n 为像元数; a 为像元尺寸; $\rho'' = 206265$ 为弧度转换为角秒时的转换系数; f' 为会聚镜头的焦距值。CCD 的测量误差 $n_{21}=0.2$ 个像元, 利用重心法求光斑位置的误差 $n_{22}=0.5$ 个像元, $a = 6.5\mu\text{m}$, $f' = 300\text{mm}$, 代入(1)式求得 $\Delta_{21} = 1.26''$, $\Delta_{22} = 3.16''$, $\Delta_2 = 1/2\sqrt{\Delta_{21}^2 + \Delta_{22}^2} = 1.7''$ 。光束监测误差的标准偏差合成为

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \sigma_i^2} = 2.0'' \quad (2)$$

5.2 发射光路装调误差分析

影响发射光路装调误差的因素主要有误差项 1~5, 误差项 1 和 2 上面已分析; 第 3 项误差 $\Delta_3 = 5''$, 为实测值, 主要受重复精度影响; 第 4 项误差 $\Delta_4 = 10''$, 主要包括垂直轴、水平轴的晃动误差和库德镜的装调误差; 误差项 5 的大小 $\Delta_5 = \arctan(b/l)$ 。式中: $b = 0.1\text{mm}$ 为光斑中心与靶标镜中心十字刻划线重合度的判读误差; $l = 3500\text{mm}$ 为发射光路的总长, 求得 $\Delta_5 = 5.9''$ 。发射光路装调误差的标准偏差合成为

$$\sigma_B = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \sigma_i^2} = 5.4'' \quad (3)$$

5.3 光轴平行装调误差分析

影响光轴平行装调误差的因素主要有误差项 1~4 和 6~9，因为在装调两光轴的平行度时，把靶标镜换成了平行度装调辅助系统，所以靶标镜没有参与光轴平行度的装调，第 5 项误差对光轴平行误差没有影响；误差项 1~4 在前面已经分析过；误差项 6 和 9 同误差项 2 的分析方法相同，计算公式同式(1)，第 7 项误差 $\Delta_7 = 2''$ 为装调辅助系统的设计指标，第 8 项误差 $\Delta_8 = 1.5''$ ，主要是机械光学零件变形引起的误差。光轴平行装调误差的标准偏差合成为

$$\sigma_C = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 + \sum_{i=6}^9 \sigma_i^2} = 5.3'' \quad (4)$$

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_C 为 $5.3''$ ，把它视为正态分布，则 $\Delta_C = 3\sigma_C = 15.9'' < 20''$ ，满足设计指标。

6 结 论

高能激光发射系统正处于从实验研究向批量生产转变的阶段，已有的装调方法成本高，工序复杂，装调周期长，满足不了批量化要求。间接测量方法的使用，克服了 CCD 等常规光电探测器的限制，降低了高能激光发射系统对光束监测和装调所使用的光学元件、电子器件的要求，提高精度的同时降低了成本，并且可用于外场。精度分析结果表明，在 CO₂ 激光发射系统装调时运用此方法，光轴平行装调精度可以达到 $15.9''$ 。

参考文献：

- [1] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京：国防工业出版社，1999.
LÜ Bai-da. **Transmission and Control of High-energy Laser** [M]. Beijing：National Defense Industry Press，1999.
- [2] Boege Steven J, Erlan S, Clifford J, *et al.* NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351 nm laser source [J]. **SPIE**, 1997, **3047**：248-258.
- [3] 苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京：国防工业出版社，2004.
SU Yi, WAN Min. **High energy laser system** [M]. Beijing：National Defense Industry Press，2004.
- [4] 浦昭邦, 陶卫, 张琢. 角度测量的光学方法[J]. 光学技术, 2002, **28**(2)：168-171.
PU Zhao-bang, TAO Wei, ZHANG Zhuo. Angle measurement with optical methods [J]. **Optical Technique**, 2002, **28**(2)：168-171.
- [5] 张东梅, 尚春民, 乔彦峰. CCD 激光自准直系统测光电经纬仪车载平台变形[J]. 光电工程, 2006, **33**(2)：25-28.
ZHANG Dong-mei, SHANG Chun-min, QIAO Yan-feng. Deformation measurement for vehicle platform of photoelectric theodolite with CCD laser collimation system [J]. **Optio-Electronic Engineering**, 2006, **33**(2)：25-28.
- [6] Saito Yusuke, Gao Wei, Kiyono Satoshi. A micro-angle sensor based on laser autocollimation [J]. **SPIE**, 2005, **6052**：60520Q.1-60520Q.9.
- [7] LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, FAN Dian-yuan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system [J]. **Chinese Optics Letters**, 2004, **2**(2)：92-94.
- [8] 李刚, 周冰, 孙新华, 等. 激光制导装置出射激光束散角和光轴平行性的简易检测方法[J]. 光学技术, 2004, **30**(5)：628-636.
LI Gang, ZHOU Bing, SUN Xin-hua, *et al.* Handy method to detect divergence angle and optical axis parallelism of laser guidance device [J]. **Optical Technique**, 2004, **30**(5)：628-636.
- [9] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京：国防工业出版社，1982.
MAO Ying-tai. **Error theory and precision analysis** [M]. Beijing：National Defense Industry Press，1982.