

神光-Ⅲ主机装置光传输系统安装精密准直技术研究

曹庭分 熊 召 李恪宇 李 奇 刘长春 叶海仙 陈海平 罗 欢

蒋新颖* 周 海 袁晓东 魏晓峰

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为实现高功率激光装置长程传输光路中反射镜法线指向的精密准直,分析了反射镜法线指向安装误差来源。针对高功率激光装置结构和安装特点,选取了预准直、模块姿态离线复制和柔性对接相结合的精密准直方案。对离线准直测量精度和复位精度进行了验证,实验数据证实了方案的可行性。该技术在神光-Ⅲ主机装置光传输系统安装调试中取得了良好的效果。

关键词 光学设计; 高功率激光装置; 传输系统; 精密准直

中图分类号 TH16 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.112201

Research on Precise Alignment Technique for Transport System Installation of Shenguang-Ⅲ Laser Driver

Cao Tingfen Xiong Zhao Li Keyu Li Qi Liu Changchun Ye Haixian Chen Haiping
Luo Huan Jiang Xinying Zhou Hai Yuan Xiaodong Wei Xiaofeng

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to realize the precise alignment of normal orientation of mirrors in the long-distance optical transmission path of high-power laser device, installation error sources based on mirror normal orientation are analyzed. As for the structural and installation features of high-power laser device, a precise alignment scheme which combines pre-collimation, module-pose off-line coping, and flexible joining is selected. The off-line collimation and reset precision are verified, and the experimental data confirms the feasibility of the above scheme. This technique has achieved favorable effectiveness in the assembly and debugging of transport system in Shenguang-Ⅲ laser driver.

Key words optical design; high-power laser device; transport system; precise alignment

OCIS codes 220.1140; 140.0140; 060.3510; 120.4630; 140.3580

1 引 言

随着高功率固体激光技术的发展,新一代巨型固体激光装置的规模与日俱增,激光装置在实际应用中面临着许多工程科学方面的问题^[1],光学机械模块安装精密准直是其中之一。

根据文献[1],光学机械模块安装精密准直按先后次序包括三方面工作:一是装置的基础结构的定位安装,包括支撑桁架、基座、定位机构以及其他结构,这些需要在装置集成安装时进行一次性定位安装;二是把光学元件组装成模块结构,与基础结构形成插入式联结;三是对于调好的高功率激光装置的光路,模块的位置均已固定,但温度变化、地基和支撑框架微振动等因素的影响造成光束偏离原定光路,需要重新校正。

对于第一项工作,通常采用激光跟踪仪和数字水准仪等测量工具建立三维控制网,通过测试三维坐标来

收稿日期: 2016-06-07; **收到修改稿日期:** 2016-07-14; **网络出版日期:** 2016-10-21

作者简介: 曹庭分(1977—),男,硕士生,助理研究员,主要从事大型激光装置工程方面的研究。

E-mail: caotingfen1977@126.com

* **通信联系人.** E-mail: noveltyymm@126.com

完成结构的定位,这种方式也是其他大型物理实验装置安装测量广泛采用的一种方式^[2-3]。第二项工作是本文涉及的,即长程光路安装精密准直,它可以实现模块的整体精确定位,使光学机械模块快速更换。新换模块能在规定的误差范围内安装到原模块的位置,不需要重新进行光路安装准直调整,可以大幅提高安装维护效率。第三项工作的目的是确保系统每次运行时,从振荡器发出的激光束能够稳定、精确地穿过预放大器、主放大器、倍频器和靶室,并精确地照射到微型靶丸上。我国已经逐步发展了有自己特色的光束自动准直系统^[4-7]。

在神光-III原型装置建设过程中,光传输系统安装精密准直采用人工在线调整的方式,该方式存在调试效率低、容易造成洁净环境破坏和光学元件人为损伤等缺点,无法用于神光-III主机装置以及下一代巨型激光装置的安装集成。国内关于长程传输光路安装精密准直的研究鲜有报道。文献[8]提供了一种建立实体化光轴、进行光学机械模块离线准直的方式,该方式操作简单,但存在准直数据难量化的缺点。

美国国家点火装置(NIF)使用准直在线可替换单元(LRU)进行传输光路准直^[9-11],法国兆焦耳装置(LMJ)使用准直工装对光学元件进行预准直^[12]。

2 反射镜法线指向安装误差来源

2.1 安装精度分析的一般原理

安装精度分析即在已知条件的基础上分析和计算安装总误差与各分误差之间的关系。

在全局坐标系下(由设计给定),假设光束中心在光学元件上的理想位置坐标为 y_0 ,其为各影响因素 x_i 的函数,数学模型为

$$y_0 = f(x_i) \quad (1)$$

当各影响因素与 y_0 为线性函数关系时:

$$y_0 = \sum_{i=0}^n A_i x_i \quad (2)$$

式中 A_i 为影响因子, n 为影响因素的总个数。

在实际结构中,各影响因素存在偏差 ΔX_i ,因此光束中心在光学元件上的实际位置坐标 y 为

$$y = f(x_i + \Delta x_i) \quad (3)$$

由(1)式和(3)式可求得光束中心的误差 Δy ,即

$$\Delta y = y - y_0 = f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i) \quad (4)$$

在实际工作中,首先根据已知的光学机械组件最大允许通光口径和正常使用通光口径来计算出光束中心偏差最大允许值 Δy_{\max} ,然后根据误差分配原则确定各分量误差的大小,各分量误差可用来验证总体方案是否正确。

光学系统数学模型通常为线性函数,或近似为线性函数,各影响因素 x_i 独立不相关,总误差可按和方根(RSS)公式计算:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 (\Delta x_i)^2} \leq \Delta y_{\max} \quad (5)$$

2.2 神光-III主机装置光传输系统简介

神光-III主机装置光传输系统是装置的重要组成部分之一,负责将激光大厅48路平行的激光束进行编组,最终上下对称地传输至靶点。图1(a)为光传输系统总体示意图,图1(b)为系统反射镜组件示意图。光传输系统整体尺寸约为45 m×33 m×22 m,包括276块反射镜、近3000 m的光束管道以及各类辅助结构。反射镜组件由反射镜架、反射镜模块和镜箱组成,其中反射镜架上的运动学定位支承由圆锥块、v型块和平面块组成。该定位支承和反射镜模块上的可调节球头支座构成了定位机构,是实现模块快速更换的特殊设计。

光传输系统单光路的平均长度约为50 m,大口径反射镜个数为5~7。光路图如图2所示,其中 $M_1 \sim M_4$ 为手动调节反射镜, M_5 为电动调节反射镜, $L_1 \sim L_4$ 代表传输距离。

2.3 光传输系统安装准直流程

先在离线的洁净精密装校间完成神光-III主机装置反射镜模块的精密装校,再由激光跟踪仪在现场空间

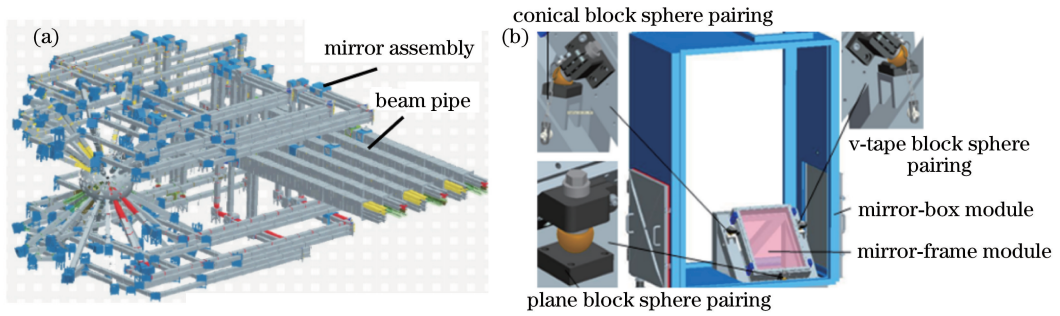


图 1 神光-III 主机装置示意图。(a) 光传输系统；(b) 反射镜模块

Fig. 1 Sketch map of Shenguang-III laser driver. (a) Light transport system; (b) mirror module

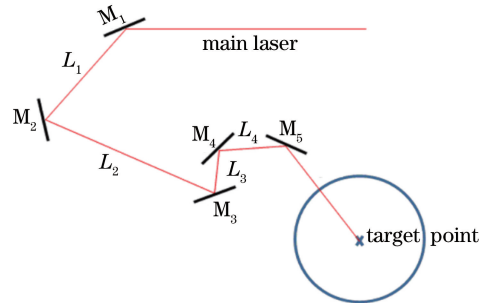


图 2 神光-III 主机装置光传输系统光路示意图

Fig. 2 Sketch map of light path of light transport system in Shenguang-III laser driver

坐标网络基准指导下完成坐标测试与定位,最后现场安装光传输系统。受测量误差的影响,如果仅采用上述步骤来实现安装,安装精度会无法达到光路通光的精度要求。为此,在反射镜模块安装之前,增加了光路预准直步骤。

光路预准直是利用准直光源提供的准直光,依据准直光在模块上的位置,调节光学支座(或模块)姿态,使准直光处于光路链中合适的位置。光路预准直采用的光源和模块称为准直光源和准直模块,其中准直模块在定位结构上与真实模块一致,因此其姿态可替代真实模块。在满足准直要求的基础上,其他部分可简化设计。

光传输系统预准直步骤如下:反射镜架现场安装完毕后,将离线准直好的准直反射镜模块安装至现场镜架上,完成单光路贯通;人工依次调节反射镜架姿态使准直光从前向后逐个指向准直反射镜中心,并最终指向靶点。将神光-III 主机装置光传输系统准直光源安装在第一个准直反射镜模块(图 2 中 M_1) 上,并将准直反射镜模块替换为真实反射镜模块。在激光大厅提供真实主激光后,调节第一块传输反射镜模块,完成光路对接,即可通光至靶点。安装准直流程如图 3 所示。

在图 3 所示流程中,准直反射镜模块和真实反射镜模块在同一离线准直平台进行准直,忽略准直设备测量精度等误差小量,准直反射镜模块与真实反射镜模块姿态可视为一致,称为模块姿态离线复制。

由于安装调试等误差,光路预准直过程中用到的准直光源的空间指向与激光大厅提供的主激光指向之间存在偏差,在准直流程的最后一步通过调节第一块反射镜架姿态来修正此偏差,进而完成光路的柔性对接。

无论是光路预准直、模块姿态离线复制还是柔性对接,目的都是为了消除安装过程中的各种误差,提高安装精度,实现模块的“一搁准”安装。

2.4 反射镜安装误差来源与法线指向精度要求

对照光传输系统安装准直流程,可以得到会引起反射镜法线指向偏移的 6 种误差。

1) 反射镜架安装定位误差。反射镜架安装定位误差会导致反射镜法线指向偏移,该部分误差经过光路预准直后可消除,因此在后面的分析中可以忽略。

2) 反射镜模块离线准直误差。反射镜离线装校以设计图纸为基准,其准直误差包括两种:一是离线准直平台基准与设计基准间的误差,该误差为系统误差,可由光路预准直步骤消除,在后续过程中可以忽略;二

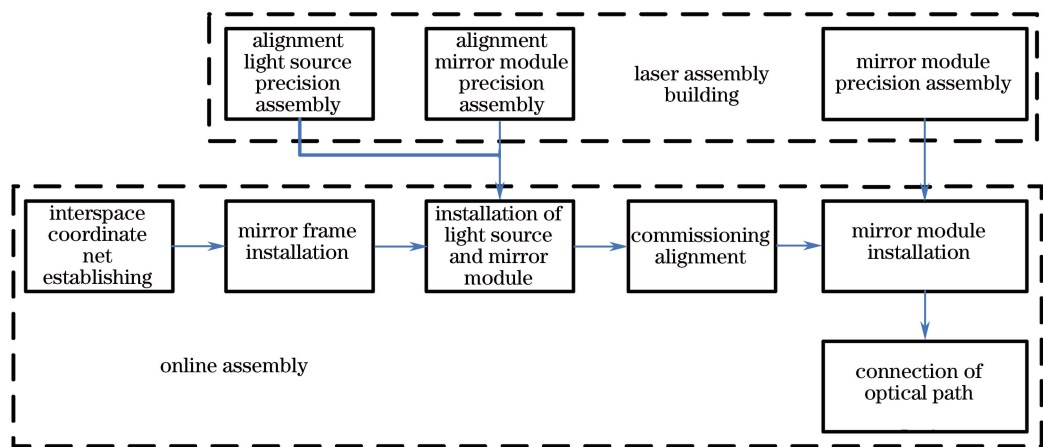


图3 神光-III主机装置光传输系统安装准直流程

Fig. 3 Flow chart of installation alignment of light transport system in Shenguang-III laser driver

是准直测量引入的反射镜模块法线指向差异。

3) 光路预准直误差。准直光在准直反射镜上的弹着点与准直反射镜中心点存在偏差,该偏差较小,可以忽略。

4) 反射镜模块复位误差。在运输振动和姿态翻转等过程中,反射镜模块法线指向发生改变。该改变主要由两个因素决定,一是反射镜模块调节球头支座过程的稳定性,二是反射镜的夹持稳定性。

5) 准直光源空间指向误差。在预准直过程中,准直光源空间指向会决定反射镜法线指向,因此准直光源指向误差会导致反射镜法线指向偏差。准直光源空间指向误差由装校偏差和系统偏差构成,该误差可由光路对接步骤消除,在后续分析中可以忽略。

6) 光路对接误差。该误差由实际对接效果决定,其值较小,可以忽略。

由以上分析可知,反射镜最终安装精度由离线准直测量误差和反射镜模块复位误差决定。

在图2中,由于手动调节反射镜安装完成后不再做姿态调整,因此反射镜法线指向精度实际是手动调节反射镜($M_1 \sim M_4$)的精度。由于各反射镜相互独立,误差叠加满足均方根原理。按误差均等原则,假设 $M_1 \sim M_4$ 法线指向偏差均为 Δ , $M_1 \sim M_4$ 法线指向偏差引入的光束总偏差不应超过 M_5 上的光束中心偏差最大允许值(5 mm),因此有

$$\sqrt{[\Delta \times (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)]^2 + [\Delta \times (L_2 + L_3 + L_4)]^2 + [\Delta \times (L_3 + L_4)]^2 + (\Delta \times L_4)^2} \leq 5. \quad (6)$$

根据神光-III主机装置光传输系统光路布局,代入相应传输光程,计算得到反射镜法线指向最大偏差允许值 $\Delta = 83 \mu\text{rad}$ 。

3 神光-III主机装置光传输系统安装准直精度验证

根据上述分析,利用离线准直平台对反射镜模块离线准直测量误差和复位误差进行了实测,并按实测误差值对安装准直精度进行了校核。

3.1 反射镜模块离线准直平台

反射镜模块离线准直平台由三部分组成,即准直工装、自准直仪和反射镜模块。其中准直工装上带有与反射镜架相同的运动学定位调节支承,同时,带有永久固定的光学基准。

采用西安光学精密机械研究所自制的 Collapex AC 300M 自准直仪,20"以内精度为0.2",全视场下精度为0.5",测量范围为1800"。

3.2 离线准直测量误差

在测量过程中温度为室温,控制温度变化不大于 1°C 。在检测区域内没有明显影响测量的振动和气流扰动的条件下,对神光-III主机装置10个反射镜模块法线指向角度进行了测试,每个反射镜模块分别测试10次,测试结果如表1所示。

表1 神光-III 主机装置反射镜模块法线指向角度检测结果

Table 1 Test results of normal pointing angle of mirror module in Shenguang-III laser driver

Mirror module number	Detection value of normal pointing angle / (")									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A1-1	0.33	0.35	0.28	0.40	0.36	0.36	0.35	0.39	0.28	0.31
A1-2	0.85	0.93	0.79	0.96	0.90	0.99	0.86	0.88	0.93	0.95
A2-1	1.35	1.40	1.33	1.36	1.42	1.33	1.29	1.36	1.38	1.40
A2-2	0.65	0.66	0.58	0.64	0.70	0.59	0.53	0.70	0.66	0.66
A3-1	0.50	0.46	0.58	0.56	0.61	0.62	0.65	0.48	0.55	0.52
A3-2	1.10	1.13	1.08	1.06	0.96	0.98	1.05	1.14	1.05	1.08
A4-1	0.88	0.86	0.96	0.77	0.68	0.82	0.83	0.75	0.79	0.81
A4-2	0.46	0.56	0.41	0.58	0.56	0.53	0.55	0.44	0.58	0.60
A5-1	1.12	1.15	1.03	1.20	1.05	0.98	1.21	1.15	0.96	1.04
A5-2	0.75	0.82	0.83	0.68	0.79	0.85	0.99	0.86	0.88	0.93

以法线指向角度测试平均值作为装校误差, 叠加自准直仪误差, 包含因子取 2, 则离线准直测量误差为 $1.626''$, 即 $7.88 \mu\text{rad}$ 。

3.3 复位误差

在合适的环境下, 对反射镜模块进行运输振动和姿态翻转模拟后测试复位误差, 共测试了三个反射镜模块, 每个模块分别测试 10 次, 测试结果如表 2 所示。

表2 神光-III 主机装置反射镜模块复位误差检测结果

Table 2 Test results of reset error of mirror module in Shenguang-III laser driver

Mirror module number	Detection value of reset error / (")									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A1-1	6.65	6.35	6.36	6.40	6.36	7.28	6.35	5.39	7.28	7.31
A1-2	4.99	5.93	4.79	5.96	4.90	4.85	6.86	5.88	4.93	5.95
A2-1	4.35	5.40	4.33	5.36	6.42	6.33	5.29	5.36	5.38	4.40

计算复位误差测试平均值, 叠加自准直仪误差, 包含因子取 2, 得复位误差为 $11.56''$, 即 $56.04 \mu\text{rad}$ 。

3.4 “一搁准”装校精度校核

离线准直测量误差与复位误差相互独立, 满足和方根关系, 因此单个反射镜模块安装准直误差为 $56.59 \mu\text{rad}$, 小于最大偏差允许值 $\Delta(83 \mu\text{rad})$, 满足反射镜模块的在线可替换要求。

4 结 论

安装精密准直方案在神光-III 主机装置光传输系统的安装应用中得到了良好的效果, 相比于神光-III 原型激光装置, 新的准直方案使光路调试时间由原来的单路 2~3 d 缩减至 0.5 d, 提高了调试效率。

预准直、模块姿态离线复制和柔性对接相结合的精密准直方案对其他的光学工程具有借鉴意义。神光-III 主机装置光传输系统属于单口径反射光路系统, 下一步工作将着重设计多口径光路(阵列光路)的精密准直方案。

参 考 文 献

- Peng Hansheng, Zhang Xiaomin, Fan Dianyuan, *et al.* Status of high power solid state lasers and engineering science[J]. Engineering Science, 2001, 3(3): 1-8.
彭翰生, 张小民, 范滇元, 等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. 中国科学工程, 2001, 3(3): 1-8.
- Yang Shengli, Man Kaidi, Chen Wenge, *et al.* Methods for surveying and alignment of huge physics experiment facilities[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(1): 40-44.
杨胜利, 满开第, 陈文革, 等. 大型物理实验装置安装定位测量技术和方法探索[J]. 核技术, 2007, 30(1): 40-44.

- 3 Wang Guofeng, Qu Huamin, Dai Xuwen. Preassembly and pre-alignment of BEPCII [J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(4): 253-257.
王国峰, 屈化民, 戴旭文. BEPC II 预安装准直测量方案设计 [J]. 核技术, 2005, 28(4): 253-257.
- 4 Liu Daizhong, Xu Renfang, Fan Dianyuan. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 1-5.
刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 激光聚变装置光束自动准直系统的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(2): 1-5.
- 5 Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, *et al.* Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 582-586.
刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4 程放大光路自动准直系统研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586.
- 6 Wang Yuancheng, Zhou Wei, Xie Xingquan, *et al.* Algorithm of cavity alignment in multi-pass amplifier system based on diffraction symmetry [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202009.
王渊承, 周 维, 谢兴全, 等. 基于衍射对称性的多程光路腔镜准直算法 [J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202009.
- 7 Zeng Peiyang, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.* Research of auto-alignment system based on Ethernet [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302009.
曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自动准直系统研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302009.
- 8 Liu Changchun, Cao Tingfen, Ye Haixian, *et al.* Precise collimation technology and assembling optical modules in high power laser facility [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922001.
刘长春, 曹庭分, 叶海仙, 等. 大型精密光学系统准直误差分析方法及其应用 [J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922001.
- 9 Bliss E S, Feldman M, Murray J E, *et al.* Laser chain alignment with low-power local light sources [C]. SPIE, 1995, 2633: 760-767.
- 10 Boege S J, Bliss E S, Choccol C J, *et al.* NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351 nm laser source [C]. SPIE, 1997, 3047: 248-258.
- 11 van Wouterghem B M, Burkhart S C, Haynam C A, *et al.* National ignition facility commissioning and performance [C]. SPIE, 2004, 5341: 55-65.
- 12 Hugget A, Journot E, Ferbos R, *et al.* New design of the laser megajoule final optics assembly [C]. SPIE, 2007, 6665: 66650U.