

文章编号: 0258-7025(2004)12-1425-04

高功率激光装置靶场光学系统的误差分析

赵东峰, 戴亚平, 尹宪华, 邵平, 华能, 李海涛

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 基于高功率激光装置主激光束精确打靶的需要,应用误差分析方法为装置的工程实施和单元技术的改进提供理论指导。针对装置在每发打靶前多应用自动准直技术来消除存在的误差,而传统的误差分析方法即随机误差和传统误差又未能进行全面系统的分析,提出了新的激光瞄准误差分析方法:静态误差和动态误差的划分。通过对靶场光学系统全面的误差分析,获得激光瞄准精度的普适性公式,并验证了该误差分析方法的正确性和可行性。

关键词 激光光学;高功率激光装置;误差分析;动态误差;静态误差

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

Error Analysis for the Optical System of Target Area on High Power Laser Facility

ZHAO Dong-feng, DAI Ya-ping, YIN Xian-hua,

SHAO Ping, HUA Neng, Li Hai-tao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract To achieve the laser accurately positioning on the target in high power laser facility, the error analysis method is necessary to actualize engineering of the facility and increase the technology of the correlational systems. The automatic alignment control system is mainly designed to establish and maintain laser chain alignment and eliminate the error, but the traditional error analysis method based on both contingency and system errors does not give a comprehensive analysis. So a new error analysis method based on both static and dynamic errors is developed. The optical system in the target area is analyzed with this method and a common equation of target positioning tolerance has been obtained. The satisfaction and feasibility of the error analysis are demonstrated.

Key words laser optics; high power laser facility; error analysis; dynamic error; static error

1 引言

随着各激光单元技术的发展,世界范围内已运转或在建造许多先进的高功率激光装置。其发展趋势为:主激光分成空间立体排布的多路子激光,光学元件数量大,传输光路长,转弯角多。为了保证主激光精确打靶,装置应具有高精密化,更应该在一发期间(几个小时内)具有高稳定性。为此需应用误差分析理论,对靶场光学系统的各元件进行光束瞄准误差分析。

对于随机叠加、相互独立的各项误差,在处理时通常使用统计方差的方式。但对于高功率激光装置,多应用自动准直技术,在每发打靶前消除装置存在的误差,而影响打靶精度除了随机误差以外,还有部分不能被静态补偿的系统误差。为了对高功率激光装置上各误差进行有效的定义和分析,将其划分为静态误差和动态误差两类。

静态误差是指误差的幅值和方向是恒定的,或者是按一定规律缓变的(变化周期大于装置调整周期),即不需要考虑时间因素对误差的影响。这样误

收稿日期:2003-07-28;收到修改稿日期:2003-11-17

基金项目:国家 863 计划(2003AA842120)资助项目。

作者简介:赵东峰(1976—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所研究实习员,主要从事高功率激光装置靶场光学技术的研究。E-mail:zdfsiom@163.com

差作为固定量来研究,可以通过静态补偿的方法来修正^[1]。例如光学元件或机械构件的加工误差、装夹误差等。

动态误差是指误差的幅值和方向是可变的,或者是按一定规律快变的(变化周期小于装置调整周期),即需要考虑时间因素对误差的影响。这样误差作为变化量来研究,无法通过静态补偿的方法来修正。例如主激光角漂、自动准直偏差、导光反射镜稳定性等。

本文主要针对无法修正的动态误差进行分析。

2 误差分析

高功率激光装置靶场光学系统包括靶室、导光反射镜、靶定位瞄准机构、模拟光系统、终端光学组件和桁架等,其中终端光学组件包括靶镜调焦机构、衍射光学元件、测量机构和倍频器。劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)正在建设的代表世界高功率驱动器最高技术的“国家点火装置”(national ignition facility, NIF),在工程实施过程中对靶场光学系统的误差进行了分析,D. J. Trummer 等认为影响打靶精度的因素主要是光学元件稳定性,即由桁架稳定性、热导传输和随机性所引起^[2]。根据高功率激光装置特点和动态误差定义,全面考虑靶场光学系统误差因素,细分为主激光偏差(main laser drift, MLD),导光反射镜稳定性(mirror),终端光学组件稳定性(final optical assembly, FOA),环境气流角漂(heating, ventilation and air conditioning, HVAC),靶机械定位误差(target positioner, TP)和靶瞄准误差(target aim, TA)等。设最终的激光瞄准精度为 Δ_{drift} , 则

$$\Delta_{\text{drift}}^2 = (\theta_{\text{MLD}} \cdot f)^2 + 4 \cdot (\theta_{\text{mirror}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{FOA}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{HVAC}} \cdot f)^2 + \Delta_{\text{TP}}^2 + \Delta_{\text{TA}}^2 \quad (1)$$

式中 θ_{mirror} 为相对光学元件法线偏差量, f 为打靶透镜的焦距。

2.1 主激光偏差

在高功率激光物理实验中,需要保证装置一发时间段内有较高的稳定性,在自动准直完成和实际打靶间有很高的稳定性。定义由于主激光角漂、模拟光角漂和远场自动准直引起主激光在靶面的偏移,叫作主激光偏差(θ_{MLD}),即

$$\theta_{\text{MLD}}^2 = \theta_{\text{ML}}^2 + \theta_{\text{AML}}^2 + \theta_{\text{ATL}}^2 \quad (2)$$

式中, θ_{ML} 为主激光角漂(main laser, ML),即主激光

光路准直和实际打靶这两个时间点之间,主放大器、主空间滤波器和导光反射镜等关键元件稳定性引起的光束漂移量; θ_{AML} 为远场自动准直误差(alignment of main laser, AML),即主空间滤波器输入处引入远场自动准直输入系统和信号接收传感器的不稳定性,也即光路准直的精度; θ_{ATL} 为模拟光角漂(alignment of target laser, ATL),即主空间滤波器输入端或输出端插入一套与主激光同轴、同波面、同波长的模拟激光系统,准直后到靶瞄准完成的这一段时间间隔内最大漂移量。而振荡器输出激光微小的角漂、前端各级放大器和空间滤波器稳定性引起的动态误差,随着光束口径的放大,被大幅地抑制(与激光放大口径成反比,只为几分之一),可以忽略。

由于“国家点火装置”前端和各级放大器、空间滤波器的地基均设置了有效的防震措施,支撑桁架应用钢筋加水泥平台,并对装置各个部分应用有限元分析,结构达到最优化。而“神光-Ⅱ”装置前端和各级放大器、空间滤波器的地基未设置有效的防震措施和装置未全部应用有限元分析,显然“国家点火装置”的主激光角漂小于“神光-Ⅱ”装置的,如表 1 所示。

表 1 “国家点火装置”和“神光-Ⅱ”装置的各项误差参数
Table 1 Tolerance parameters in NIF and SG-Ⅱ high power laser facilities

Tolerance source	NIF	SG-Ⅱ
θ_{ML}	4.85 μrad	14.55 μrad
θ_{ATL}	0 μrad	5 μrad
θ_{AML}	1.6 μrad ^[7]	2.4 μrad
θ_{mirror}	0.68 μrad ^[7]	1.5 μrad
θ_{FOA}	1 μrad ^[4]	5 μrad
θ_{HVAC}	0.1 μrad ^[7]	1 μrad
Δ_{TP}	6 μm ^[6]	8 μm ^[5]
Δ_{TA}	6 μm ^[6]	8 μm ^[5]

对于远场自动准直误差,由于采用不同的光学系统导入准直光(“国家点火装置”用光纤,而“神光-Ⅱ”用可移动反射镜),这样“神光-Ⅱ”装置的误差远远大于“国家点火装置”,如表 1 所示。

对于模拟光角漂,扩束系统前各光学元件稳定性引起的角漂和激光器角漂被大幅抑制成为一个小量,而这较小的角漂,由于模拟光扩束镜和多块反射镜的不稳定性,以及镜面镀膜的不均匀性,反映在远场(靶面或自动准直传感器)上光斑和光强的变化而产生较大的角漂。这里,“国家点火装置”的远场自

动准直光源可同时作为靶场准直光,就不存在模拟光角漂。

2.2 导光反射镜稳定性

高功率激光装置的导光反射镜系统由反射镜、装夹机构、调节机构和支撑桁架所组成,反射镜为大尺寸光学元件,影响其稳定性的主要有:1)各调节机构的锁紧方式,对其优化可减少反射镜稳定性受到桁架振动、热传导、气流振动等影响;2)反射镜装夹方式,应用有限元分析可优化稳定性和镜面变形量间关系,并静态补偿调整机构和装夹机构产生的偏差^[1]。一般光路中导光反射镜数量两块以上,故

$$\theta_{\text{mirror}}^2 = (\sum_i \theta_{\text{mirror}})^2 \quad i > 2 \quad (3)$$

为了提高稳定性,应让导光反射镜自振频率、地面振动频率、桁架振动频率和马达运行频率相互错开,以免产生共振;利用空调系统,让实验室保持合适的温度。

2.3 终端光学组件稳定性

高功率激光装置的终端光学组件和导光反射镜一样,为大尺寸光学元件,主要包括窗口玻璃、倍频晶体、靶镜、衍射光学元件和防溅射板。对终端光学组件稳定性产生主要影响的是靶室在真空维持状态下的低频抖动(1~5 Hz),而靶室抽真空前后变形的影响可以忽略,这是因为靶瞄准和正式打靶均在真空状态下完成的(即靶室变形是一种静态误差)。另外调整机构和装夹机构产生的静态误差和镜面变形可应用有限元分析补偿。

“国家点火装置”的终端光学组件稳定性为 1 μrad ;“神光-II”装置的终端光学组件(其中倍频晶体未包含于内,为独立的机械构件,稳定性与伺服反射镜一致)稳定性优于 5 μrad 。

2.4 环境气流角漂

整个实验室需保持恒温恒湿,靶场空调排风系统、人员走动和噪音引起空气气流的振动,空气密度不均匀而引起折射率时刻在变化,加上靶场的传输光路很长,这种气流扰动作用,会造成光传输的部分偏差。需要设计合理的空调排风系统,以及在伺服反射镜上加镜罩和光路全程管道化,以减少气流振动对光传输的扰动^[2~4]。

“神光-II”靶场终端光学系统未加光路管道和反射镜罩,这部分偏差为 1 μrad 。而“国家点火装置”靶场光路在空调系统合理设计以及光路管道化的前提下,这部分偏差小于 0.1 μrad 。

2.5 靶机械定位误差

高功率激光物理实验的靶具有各种形状,为了满足要求,靶机械定位系统应具有五维调整,即三维平移再加二维旋转,全部采用步进马达驱动。靶机械定位误差主要与靶架机械稳定性、分辨率以及自动定位程序偏差许可范围有关。

目前,“神光-II”靶机械定位误差为 8 μm ^[5]。“国家点火装置”靶机械定位误差为 6 μm ^[4,6,7]。

2.6 靶瞄准误差

靶瞄准定位系统是利用二维或三维相互正交的 CCD 靶定位望远镜系统。其靶瞄准误差主要与伺服反射镜调整分辨率、望远镜系统光学和电子分辨率、靶瞄准照明以及图像采集和处理能力有关。

“神光-II”装置靶瞄准误差为 8 μm 。而“国家点火装置”的靶瞄准误差为 6 μm ^[6,7]。根据以上误差分析,将(2)式和(3)式代入(1)式,可获得高功率激光装置瞄准偏差 Δ_{drift} 的普适性公式

$$\Delta_{\text{drift}}^2 = (\theta_{\text{ML}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{AML}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{ATL}} \cdot f)^2 + 4 \cdot (\sum_i \theta_{\text{mirror}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{FOA}} \cdot f)^2 + (\theta_{\text{HVAC}} \cdot f)^2 + \Delta_{\text{TP}}^2 + \Delta_{\text{TA}}^2 \quad i > 2 \quad (4)$$

3 数值计算

将表 1 的相关误差参数,代入(4)式,计算验证该误差分析的正确性和可行性。取导光反射镜数为 4,即 $I=4$,得到“国家点火装置”和“神光-II”装置的激光瞄准精度,如表 2 所示。

表 2 不同高功率激光装置的激光瞄准精度
Table 2 Target positioning tolerance of different high power laser facility

High power laser facility	NIF $f=7000 \text{ mm}$	SG-II $f=750 \text{ mm}$
$\Delta_{\text{drift}} / \mu\text{m}$	53.38	18.97
$\Delta_{\text{drift}} / f (\times 10^{-6})$	7.63	25.29

由表 2 可看出,“国家点火装置”主激光瞄准精度($\Delta_{\text{drift}}=53.38 \mu\text{m}$)和“神光-II”装置主激光瞄准精度($\Delta_{\text{drift}}=18.97 \mu\text{m}$),与实际物理实验结果相近(劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的装置为 50 μm (RMS),“神光-II”装置为 20 μm (RMS))。同时“国家点火装置” $\Delta_{\text{drift}}/f=7.63 \times 10^{-6}$ 远小于“神光-II”装置 $\Delta_{\text{drift}}/f=25.29 \times 10^{-6}$,显然“国家点火装置”的主激光瞄准高于“神光-II”装置。

4 结 论

将误差分类为动态误差和静态误差,使靶场光学系统中影响激光瞄准精度的各种因素易于归类和较全面地分析,获得了相关误差因素与激光瞄准精度普适性公式。为进一步提高激光瞄准精度,可以: 1) 对大尺寸光学元件由于加工和装夹等引起的静态误差,应用有限元分析进行静态补偿; 2) 对不可补偿修正的动态误差,可提高有关光学元件或机械构件的关键参数和最优匹配。因此,该误差分析可应用于相近高功率激光装置瞄准精度的分析和提高。

参 考 文 献

1 Quanhui Zhang, Jianqiang Zhu, Dianyuan Fan. Force analyses and torsional stiffness calculation of a new flexure pivot [C].

SPIE, 1999, **3737**:348~353
 2 D. J. Trummer, R. J. Foley, G. S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:363~371
 3 G. L. Tietbohl, S. C. Sommer. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers [C]. *SPIE*, 1997, **3047**:649~660
 4 V. Karpenko, W. Gibson, A. McDonald *et al.*. Target Area Systems [R]. UCRL-LR-105821-97-3; 166 ~ 179, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA
 5 Dai Yaping, Huang Guanglong, Li Xuechun *et al.*. Precision target positioning by digital image correlation measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2):135~139
 戴亚平,黄关龙,李学春等. 用相关测量技术实验精确靶定位技术研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2):135~139
 6 L. Pittenger. National Ignition Facility Subsystem Design Requirements Target Positioning Subsystem [R]. UCRL-ID-126985 Rev 2;1~12, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA
 7 Stanley C. Sommer, Erlan S. Bliss. Beam Positioning [R]. NIF-0004579; 112 ~ 135, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA

BaWO₄ 晶体的受激拉曼散射

受激拉曼散射(SRS, Stimulated Raman scattering)属三阶非线性光学效应,它利用非弹性散射使入射激光产生一定频移,从而获得新波长激光,是一种有效的激光变频方式^[1,2]。我们利用波长为 532 nm,频率为 10 Hz 的皮秒脉冲激光作为抽运源,采用单次通过方法实现了 BaWO₄ 晶体的受激拉曼散射。抽运光束的初始直径为 4 mm,采用一个由双透镜组成的缩束系统将其减小至 1 mm,以提高入射到晶体上的功率密度。BaWO₄ 晶体为 *c* 向切割,长度为 30 mm,抽运光偏振沿晶体 *a* 向。用滤色片滤除晶体出射光束中的剩余抽运光,再用一个会聚透镜将产生的受激拉曼激光收集起来,用于能量及光谱的测量。

在 0.25 mJ 的单脉冲抽运能量下,获得了 0.07 mJ 的受激拉曼激光,转换效率为 28%。受激拉曼激光包含两种颜色的橙黄光,采用 Ocean Optics 公司的 USB2000-VIS-NIR 型光谱分析仪测试其波长

分别为 559.7 nm,590.3 nm,与 BaWO₄ 晶体的 1 级和 2 级斯托克斯线相对应。考虑到 532 nm 抽运绿光的脉冲宽度约为 40 ps,由此可以估计本实验的抽运功率密度约为 800 MW/cm²。进一步工作正在进行中。

参 考 文 献

1 T. T. Basiev, A. A. Sobol, P. G. Zverev *et al.*. Raman spectroscopy of crystals for stimulated Raman scattering [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**(4):307~314
 2 Pavel Černý, Peter G. Zverev, Helena Jelinková *et al.*. Efficient Raman shifting of picosecond pulses using BaWO₄ crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**:397~404

山东大学晶体材料国家重点实验室,
 山东济南 250100
 王正平,张怀金,许心光,
 王继扬,邵宗书,蒋民华
 收稿日期:2004-10-21