

# 大型精密光学系统准直误差分析方法及其应用

刘长春 曹庭分 叶海仙 徐 旭 陈海平 罗 欢 袁晓东 熊 召\* 张 亮 易聪之

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 大型高功率固体激光装置神光 III 中包括许多大型、精密光学模块,完成各类模块高精度准直是一项巨大的技术挑战。提出了基于光传输建模分析,数值计算、工程实践 3 个层次相融合的大型光学系统准直误差分析方法,并以空间滤波器系统为对象进行了深入的研究与分析。针对模块准直精度建立了带误差传递的光传输模型,借助误差分析方法,分析了主影响因子及权重,结合工程实际,完成了模块光轴精度分解。采用光轴实体化表征技术和齐次矩阵变换方法,实现了模块、光轴、镜片位姿统一表征,结合激光跟踪仪,完成准直平台设计。最后以具有亚毫弧度准直要求的典型光机模块为例,在工程环境下搭建了准直平台,验证了理论分析方法在实际工程中的适用性。这一方法对激光聚变装置中光机模块精密准直技术研究有着普遍指导意义。

**关键词** 测量; 光机模块; 精密准直; 精度分解; 坐标变换

**中图分类号** TH16                      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0922001

## Precise Collimation Technology and Assembling Optical Modules in High Power Laser Facility

Liu Changchun Cao Tingfen Ye Haixian Xu Xu Chen Haiping Luo Huan  
Yuan Xiaodong Xiong Zhao Zhang Liang Yi Congzhi

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

**Abstract** SG-III power laser facility includes many large aperture optical modules, and it is a huge technical challenge to accomplish precise collimation of those units. A comprehensive error analysis methodology based on integrated light propagation theory, numerical calculation, engineering experience is proposed. Firstly, light transmission function with angle error in each mirror is built up, and the main influence factors are analyzed by means of error theory. Thus error decomposition in each light axis of optical module is employed in according with practical situation. Secondly, light axis materialization and homogeneous matrix transformation methods are utilized to depict the relationship of module, light axis, mirrors in one coordinate system, then the design of collimation stage is accomplished with the help of laser tracker. Finally, a assembling stage of typical module for collimation is set up and validated the proposed methodology which is extremely helpful to study the precise collimation technology in high power laser system.

**Key words** measurement; optical module; precise collimation; precision decomposition; coordinate transformation

**OCIS code** 130.6622; 140.3295; 220.4830

## 1 引言

我国在建的大型高功率固体激光装置神光 III(SG-III)是一个非常巨大的科学工程包含 48 路长程光束,空间跨距超过 200 m,光程达千米,主要用于惯性约束聚变领域科学技术研究,提供超高温、超高压实验环境。整体装置分为激光大厅和靶场两大部分,激光大厅用于激光多程放大,提供数千焦耳级激光,靶场用于

收稿日期: 2015-02-11; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国防科工局技术基础项目(JSJC2013212C002)

作者简介: 刘长春(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机精密装配及检测技术方面的研究。

E-mail: njdachun1234@163.com

\*通信联系人。E-mail: xiong\_022111@163.com

光束编组、空间走向控制使激光束围绕靶球在不同经纬角入射,形成南北半球对称入射激光束组,作用于靶球,开展一系列极端条件下的物理实验。

为了获得高能激光,激光束需在激光大厅来回4次传输,能量才能从焦耳级提高到千焦耳级。四程光路走向控制部分统称为空间滤波器系统(简称空滤),该系统准直精度要求极高,达  $50 \mu\text{rad}$ ,由众多大型光机模块构成,最大长度为  $1.8 \text{ m}$ ,重量达  $100 \text{ kg}$ ,在超洁净条件下(百级)工作。激光束四程光路能否实现及性能受模块准直精度制约,因此开展精密准直技术研究对空滤系统及其他功能段性能达标具有代表性意义<sup>[1-3]</sup>。

为了提高装置建设效率,空滤系统采用了模块调试与激光装置光路调试并行作业工作模式,既空滤光机模块先在准直平台上完成精密准直调试,使模块光学镜片位姿与设计值一致后,再把模块安装到激光装置本体内,无需大量调试即可满足光路准直精调要求。在精密调试环境,光轴为人为定义,属于虚拟体,对调试人员来说,需首先解决模块各光轴可视难题。同样,模块镜片空间位姿理论值也是虚拟体,必须实现镜片理论位姿到准直平台精确过渡,建立实体过渡基准,间接表征镜片、模块、光轴位姿,在同一坐标系内确立模块、镜片、平台光轴三者间空间位姿关系。因此,开展准直平台关键技术研究对神光III装置光机模块精密准直工程实施具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

本文以近场误差、远场指向精度为约束条件,以优化模块内镜片准直精度分解及离线准直平台设计为任务内容,深入探讨了模块准直误差形成机理及准直平台设计关键技术,结合工程实际,分析出光机模块离线精密准直方法,最后以空滤典型模块为例对上述方法进行了简要说明。目的是为后续更高能量激光器及其它模块化构型的大型科学装置设计提供借鉴。

## 2 光传输准直误差分析

如果把光机模块当做镜头,入射光轴某一面为入瞳面,为了得到镜头出瞳面理想成像位置,则须控制入瞳光束位置和角度,对模块而言,精密准直包含了近场位置、远场角度准直2个方面。

激光在模块镜片内逐级传播,形成串联传输系统,则输出激光束准直精度受光学系统自身传函、输入端误差、输出端误差制约(如图1所示)<sup>[6-8]</sup>。因光学系统自身传递函数,即光传播规律,主要跟镜片设计参数、加工质量、装配质量相关,而神光III主机装置光机模块处于恒温、恒湿洁净环境,装配后的传递函数主要受装配精度影响,且随时间变化极小,输出环节无影响光束近场、远场准直精度误差源,因此可以把模块当成一个恒定系统看待,准直精度仅受各光学系统输入端误差、镜片装配误差影响(如图2所示)。

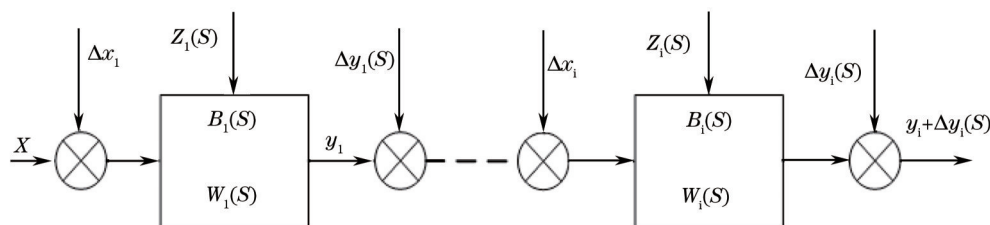


图1 各环节带扰动的串联系统误差模型

Fig.1 Series system error model with turbulence input at each segment

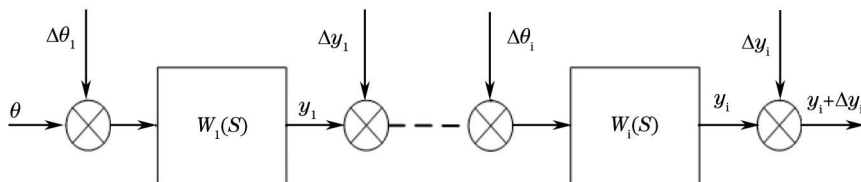


图2 传函恒定串联系统误差模型

Fig.2 Series system error model with consistent turbulence input

对于恒定光学系统光传输规律可以用镜片带角度误差的光传输模型进行分析<sup>[9-12]</sup>。光机模块光学镜片主要分为反射、透射两类。单块镜片对光传输影响可以用光传输矩阵表征：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \phi_2 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \phi_1 \\ \psi_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为镜片光传输函数, 为  $4 \times 4$  矩阵。

对于轴对称光学系统, 光传输矩阵变为  $2 \times 2$  阵列矩阵, 光传播规律为

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,  $r$  为入瞳面光轴法向位置量,  $\theta$  为光线与入瞳面光轴夹角。

对于多镜片光机模块, 总变换矩阵由各镜片变换矩阵左乘得到

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_n \mathbf{T}_{n-1} \cdots \mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因此, 可以认为光传输矩阵为模块准直输出与输入的传递函数, 且出射光位置、角度参数为

$$\begin{cases} r_n = A_n x_1 + B_n \theta_1 \\ \theta_n = C_n x_1 + D_n \theta_1 \end{cases}. \quad (4)$$

对神光 III 激光装置而言, 镜片尺寸均比实际光束口径大, 平面类镜片在沿迎光面切向平移时, 光传输矩阵不变, 准直精度主要受角度偏差影响, 对角度具有较高敏感度。

推导带角度误差的光传输矩阵。设模块入射光轴入瞳面入射准直误差为  $[r, \theta]$ , 到第 1 块光学镜片 IM1 距离为  $l_1$ , 反射后的光束理想位姿为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_1} = \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + l_1 \theta \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

可以看出, 在光学镜片无角度偏差时, 反射光束与入射光束角度偏差相等, 然而在实际情况中, 镜片必然存在一定角度误差, 引入角度输出误差  $\Delta\theta_1$ , 此时第 1 块元件输出光束实际位姿为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_1} = \begin{bmatrix} r + l_1 \theta \\ \theta + \Delta\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

若输出光束传输距离  $l_2$  到达第 2 块反射镜片, 反射光理想输出位姿为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_2} = \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{output}_1} = \begin{bmatrix} r + l_1 \theta + l_2 (\theta + \Delta\theta_1) \\ \theta + \Delta\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,  $l_2$  为两块镜片迎光面中心点间距。

设第 2 块反射镜片装配角度误差为  $\Delta\theta_2$ , 则实际输出结果为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_2} = \mathbf{F}_{\text{output}_2} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + l_1 \theta + l_2 (\theta + \Delta\theta_1) \\ \theta + \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

若光传输  $l_3$  距离则到达第 3 块反射镜, 反射光理想输出结果为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_3} = \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{output}_2} = \begin{bmatrix} r + (l_1 + l_2 + l_3) \theta + (l_2 + l_3) \Delta\theta_1 + l_3 \Delta\theta_2 \\ \theta + \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

带附加装配角度误差  $\Delta\theta_3$  的实际输出结果为

$$\mathbf{F}_{\text{output}_3} = \begin{bmatrix} r_{3r} \\ \theta_{3r} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{\text{output}_3} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + (l_1 + l_2 + l_3) \theta + (l_2 + l_3) \Delta\theta_1 + l_3 \Delta\theta_2 \\ \theta + \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

依次类推, 即可得到入射光经一系列反射镜片作用后的传播规律, 对于透射镜片, 只需更换此处反射镜光传输矩阵即可。

对于 3 块反射镜构成的光机模块, 出射光出瞳处总随机误差为

$$\begin{cases} \Delta r_{\text{total}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{\partial r_{\text{total}}}{\partial \Delta\theta_i} \Delta\theta_i \right)^2} + \Delta r^2 = \sqrt{(l_1 + l_2 \dots l_n)^2 \Delta\theta^2 + (l_1 + l_2 \dots l_{n-1})^2 \Delta\theta_1^2 \dots + l_n^2 \Delta\theta_{n-1}^2} + \Delta r^2 \\ \Delta\theta_{\text{total}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta\theta_i)^2} \end{cases}. \quad (11)$$

可以看出,镜片角度偏差对模块出瞳面出射光位置偏差  $\Delta r_{total}$  为非等精度影响,对输出角度  $\Delta r_{total}$  为等精度影响,既对光机模块输出激光近场光斑位置为非等精度影响,对远场指向为等精度影响。

镜片装配角度偏差必须兼顾两者要求,合理分配。在对镜片角度误差分配时,可以首先按等影响原则初步分解,得到精度初始值,然后根据工程实施具体情况微调镜片角度误差,完成镜片精度优化分配<sup>[6]</sup>。

角度精度初始值为

$$\begin{cases} \Delta\theta_i = \frac{\Delta r_{total}}{\sqrt{n}(l_1 + l_2 \dots l_i)} \\ \Delta\theta_i = \Delta\theta_{Total} / \sqrt{n} \end{cases} \quad (12)$$

可以看出,角度精度有2种结果,通常不相等,应选取最小值作为初始量。

在对镜片角度精度调整时,需考虑量具激光跟踪仪精度、工程实施难度、百级洁净实验室空间利用率等具体因素,以提高效用比和准直平台搭建效率。镜片角度偏差通常应大于  $150 \mu\text{rad}$ , 否则模块工程实施难度、成本、准直平台占地面积会大幅增加。

### 3 准直平台的设计原理

准直平台用于模块精密准直调试,以实现光学镜片理论位姿精确复现,需解决光轴可视化及光轴、模块、元件空间关系量化表征技术问题。为了实现光轴可视,通过建立光轴基准点的方式实现。既在模块每条光轴上架设2个高精度机械小孔,用小孔中心连线表示光轴,外加可见细激光束,对称穿过2个小孔,建立一条人眼可见的准直细激光束,把不可见的光轴转化为可视的激光束(如图3所示)。在模块准直时,调整镜架4个自由度,使每个镜片出射光均对称穿过对于光轴2个小孔,以实现快速准直模块的目的。

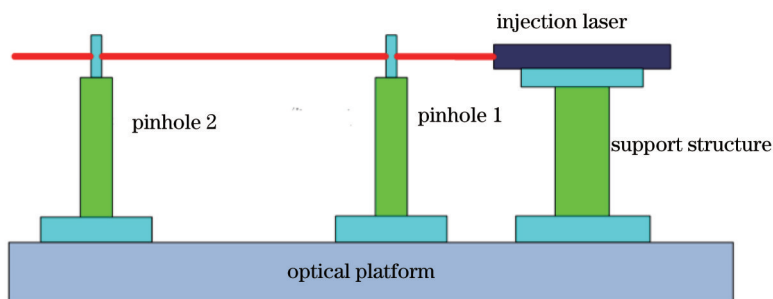


图3 光轴实体化表示

Fig.3 Materialized optical axis structural diagram

可视化基准轴角度精度为

$$\begin{cases} \theta_H = \tan \theta_H = \frac{\Delta d_H}{l} \\ \theta_V = \tan \theta_V = \frac{\Delta d_V}{l} \end{cases}, \quad (13)$$

式中,  $\Delta d_H$ 、 $\Delta d_V$  为各坐标系原点相对理论值在光传播方向正交面上两坐标轴上的偏差,  $l$  为可视化光轴上2基准小孔中心距。

为确保模块光学镜片准直后位姿跟理论值一致,需把镜片、模块复位机构、准直平台光轴基准等空间关系统一到同一坐标系内表征,为准直平台设计、校核提供基础数据,达到快速搭建、维护准直平台目的。

准直平台主要包括入射光轴基准小孔、模块定位零部件、出射光轴基准,均为刚体,相互关系用齐次矩阵变换得到<sup>[8]</sup>。

首先对各刚体建立自身坐标系,表征刚体位姿,可细分为基准小孔坐标系、光学元件坐标系、定位零件坐标系等。在模块入射光轴第一基准小孔处建立坐标系  $T_0$ , 其余刚体坐标系通过平移、旋转变换与  $T_0$  建立映射关系,得到各坐标系在  $T_0$  内投影。

平移变换因子为

$$\mathbf{F}_{\text{Trans}}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

旋转变换因子为

$$\mathbf{F}_{\text{Rot}}(k, \theta) = \begin{bmatrix} k_x k_x F_{\text{vers}}(\theta) + c\theta & k_y k_x F_{\text{vers}}(\theta) - k_z s\theta & k_z k_x F_{\text{vers}}(\theta) + k_y s\theta & 0 \\ k_x k_y F_{\text{vers}}(\theta) + k_z s\theta & k_y k_y F_{\text{vers}}(\theta) + c\theta & k_z k_y F_{\text{vers}}(\theta) - k_x s\theta & 0 \\ k_x k_z F_{\text{vers}}(\theta) - k_y s\theta & k_y k_z F_{\text{vers}}(\theta) + k_x s\theta & k_z k_z F_{\text{vers}}(\theta) + c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

式中,

$$F_{\text{vers}}(\theta) = 1 - \cos \theta, \quad (16)$$

$k_x, k_y, k_z$  分别是  $\mathbf{k}$  矢量在固定参考坐标系坐标值  $x, y, z$  上的 3 个分量, 且

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = 1. \quad (17)$$

模块镜片入射、出射光轴基准点及模块定位零部件坐标系相对  $T_0$  位姿关系可以通过齐次矩阵变换方法得到。

入射光轴另一基准小孔位姿矩阵

$$\mathbf{T}_1 = \mathbf{F}_{\text{Trans}}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)E, \quad (18)$$

式中  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  为基准小孔相对  $T_0$  偏移量,  $E$  为 4 阶方阵。

单个定位零部件变换矩阵为

$$\mathbf{T}_2 = \mathbf{F}_{\text{Rot}}(k, \theta)\mathbf{F}_{\text{Trans}}(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1), \quad (19)$$

式中,  $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$  为定位支撑相对  $T_0$  偏移量,  $\theta_1$  为定位支撑绕  $\mathbf{k}_1$  矢量转动角度。

出射光轴基准位姿变换矩阵为

$$\mathbf{T}_3 = \mathbf{F}_{\text{Trans}}(\Delta x_3, \Delta y_3, \Delta z_3)\mathbf{F}_{\text{Rot}}(k, \theta)\mathbf{F}_{\text{Trans}}(\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2), \quad (20)$$

式中,  $\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$  为镜片坐标系相对  $T_0$  平移量,  $\theta_2$  为镜片绕  $\mathbf{k}_1$  矢量转动角度,  $\Delta x_3, \Delta y_3, \Delta z_3$  为出射光轴基准小孔坐标系相对镜片平移量。

准直平台光轴基准、模块定位零件精度受模块精度要求、光传播规律制约, 由(12)式给出的精度值可以作为各基准点精度初始值, 需根据平台大小、光路结构实际情况做微调, 提高工程实施性价比。

#### 4 典型模块简介及其准直技术

典型模块(由图 4 所示)为空滤模块之一, 主要由反射镜片、镜架、支撑框组成, 镜片编号分别为 IM1、IM2、IM3, 安装于镜架内。镜架通过水平、高低平移和俯仰、偏摆角度 4 个自由度调整镜镜片姿态, 使反射光轴指向与设计值一致。

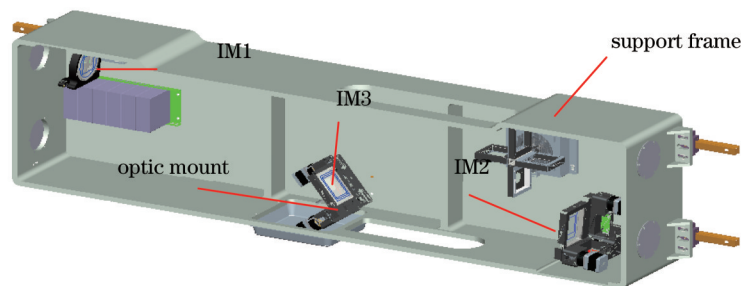


图 4 典型光机模块结构和镜架

Fig.4 An exemplary optic-mechanical module structure and its inner mirror mounts

模块入射光经 IM1、IM2 非同轴光学镜片转折传输后到达模块出光口 IM3 处(如图 5 所示)。

模块准直性能要求如下: 模块入射平行光到达 IM3 处中心偏差及指向角度偏差分别为 3 mm 和 1 mrad。



目的是确保模块出射激光束满足下游模块对接要求。

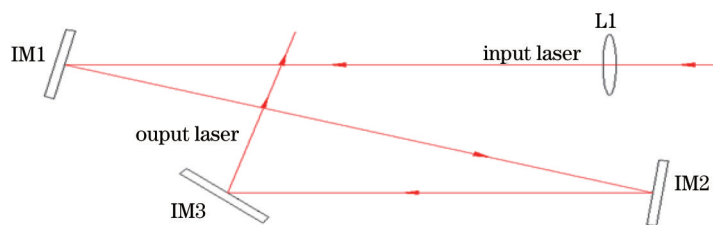


图5 典型模块光路

Fig.5 Optical path of typical module

模块精密准直后,通过基准传递方式实现模块光学镜片离线、在线两种状态位姿统一,既对模块精密准直、在线建设流程如图9所示。运行两种状态设置相同的安装定位接口,使已准直模块安装到装置后光学镜片位姿正确,直接使用(如图6.7所示)。为了快速、批量精密准直该模块,设计了专有精密准直平台(如图8所示),建设流程如图9所示。

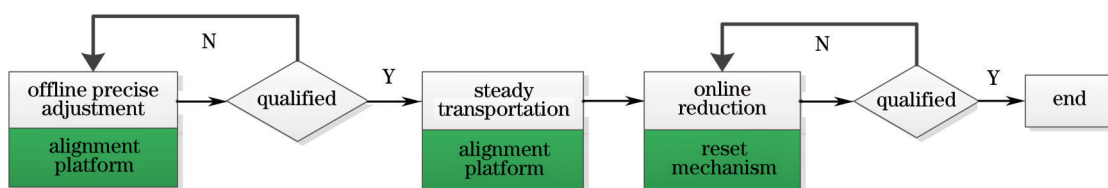


图6 典型模块生产流程

Fig.6 Production flow chart of optic-mechanical moduls

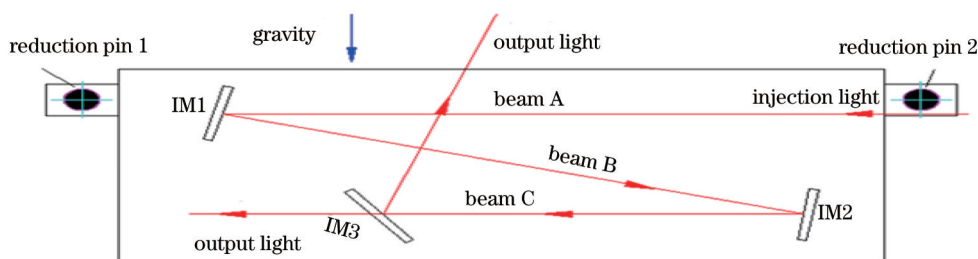


图7 典型模块复位机构(定位销)

Fig.7 Returning mechanism of an optic-mechanical module

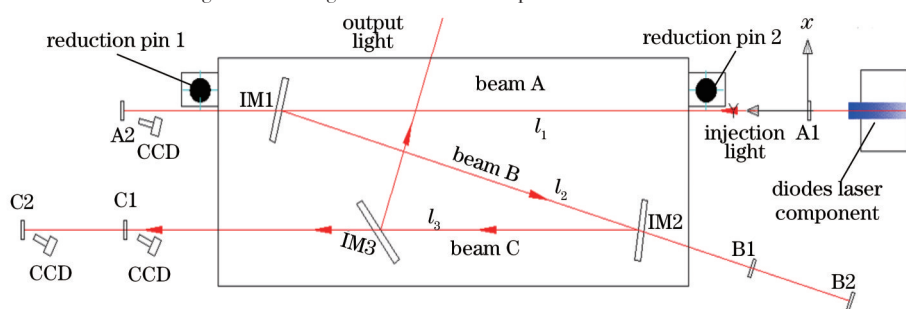


图8 典型模块准直平台布局图

Fig.8 Alignment platform layout of an optic-mechanical module

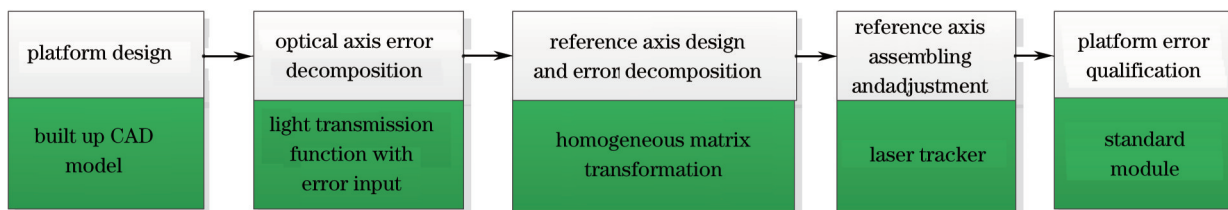


图9 典型模块准直平台搭建流程

Fig.9 Alignment platform construction flow chart of the optic-mechanical modules

典型模块入射准直激光束位置误差经高精度调整机构调整后通常较小,小于0.1 mm,可以做为微小误差处理,既是(11)式中  $\Delta r$  可以忽略。

典型模块 IM1、IM2、IM3 中心距  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  分别为 2000 mm、1350 mm、650 mm。对位置误差  $\Delta r_{\text{Total}}$  而言,入射光轴、IM1、IM2 角度误差影响因子分别为 4000、2000、650,由(12)式可知,对位置误差,按等影响原则分配时,  $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$  值分别为 400  $\mu\text{rad}$ 、800  $\mu\text{rad}$ 、2700  $\mu\text{rad}$ ,如果按照 3- $\sigma$  原则(99.7%概率)分配随机误差标准差,则  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$  值分别为 133  $\mu\text{rad}$ 、267  $\mu\text{rad}$ 、900  $\mu\text{rad}$ ,即入射光束、IM1、IM2 角度误差分别为 133  $\mu\text{rad}$ 、267  $\mu\text{rad}$ 、900  $\mu\text{rad}$ 。对角度误差,按等影响原则分配时,镜片角度误差均为 570  $\mu\text{rad}$ 。因此为了满足位置、角度误差要求,  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$  分别为 133  $\mu\text{rad}$ 、267  $\mu\text{rad}$ 、570  $\mu\text{rad}$ 。

为在洁净实验室内实现 133  $\mu\text{rad}$  的准直误差,在量具激光跟踪仪精度恒定情况下,由(11)式可知,只有增加基准小孔间距,增加准直平台面积,使洁净实验室空间利用率降低,可能会与其他模块准直平台发生干涉,因此需要对角度精度微调。在保证模块准直精度前提下,以优化准直平台面积为目标,结合激光跟踪仪精度和工程实施难度,对  $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$  取值适当调整,需多次迭代,当  $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = 200 \mu\text{rad}$ ,  $\Delta\theta_3 = 300 \mu\text{rad}$  时,准直平台面积最小,此时  $\Delta r_{\text{total}} = 0.97 \text{ mm}$ ,  $\Delta\theta_{\text{total}} = 0.28 \text{ mrad}$ ,满足使用要求。

模块实际输出光束角度精度主要由光轴基准小孔位置精度和激光穿孔精度决定。小孔在架设过程中以激光跟踪仪为监视手段,量具精度为 16  $\mu\text{m} + 8 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ,典型模块长度为 1.8 m,在入射光轴基准小孔间距为 2 m 时,跟踪仪自身引入极限位置误差为 0.096 mm,转化为角度误差为 48  $\mu\text{rad}$ ,为降低小孔架设难度,增加角度误差上限值,在角度精度为 160  $\mu\text{rad}$  时,光轴 2 个基准小孔位置极限偏差为 0.16 mm,约为跟踪仪精度 10 倍,信噪比、可信度较高,此时准直细光束准直误差限为  $\sqrt{200^2 - 160^2} = 120 \mu\text{rad}$ ,也就是说,在架设准直细光束时,在入射光轴第 2 基准小孔处光斑与小孔中心偏差限为 0.24 mm,人眼可分辨,便于光轴架设,提高作业效率。

按同样方法可以得到模块镜片光轴架设误差和激光穿孔误差,如表 1 所示。

表 1 典型模块元器件角度精度分解

Table 1 Angel precision decomposition of the typical module

Title	Angle error distribution		Platform error distribution	
	Initial	Optimization	Aperture precision	Punch precision
Incident light	133	200	160	120
IM1	267	200	160	120
IM2	900	300	200	250

在对其准直平台建设时,基准小孔 H2 坐标系相对 H1 的变换矩阵为

$$T_2^1 = F_{\text{Trans}}(0, l_1, 0) = F_{\text{Trans}}(0, 2000, 0) \quad (21)$$

IM1 出射光轴上小孔 H3 坐标系相对 H1 的变换矩阵为

$$T_3^1 = F_{\text{Trans}}(0, \Delta l, 0) F_{\text{Rot}}(Z, \theta) F_{\text{Trans}}(0, l_1, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

IM1、IM2 出射光夹角理论值为 36°,基准 H3 到 IM1 中心距  $\Delta l = 1600 \text{ mm}$ ,则上式为

$$T_3^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1600 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 36^\circ & -\sin 36^\circ & 0 & 0 \\ \sin 36^\circ & \cos 36^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2000 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 36^\circ & -\sin 36^\circ & 0 & 982.04 \\ \sin 36^\circ & \cos 36^\circ & 0 & 142.29 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

该式表明基准小坐标系 H3 原点及小孔圆心坐标值为(982.04,142.29,0),迎光面绕 H1 坐标系 z 轴顺时针旋转 36°。其他基准小孔及定位支撑球位姿关系按类似方法求解,得到每个坐标系相对 H1 的变换矩阵,完成了模块在线位姿到准直平台过渡。

在准直平台基准调试时,各基准坐标系位姿满足表 1 中小孔精度即可。待平台架设完成后,以调试合格的标准模块代替典型模块放入准直平台即可验证准直平台是否正确。

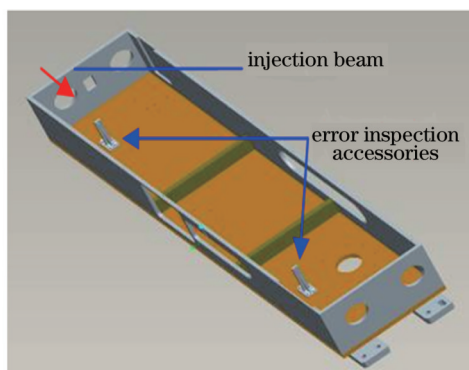


图 10 标准模块结构

Fig.10 Schematic of standard module

## 5 结 论

高能固体激光器神光Ⅲ激光装置结构复杂、大型光机模块数量多,结构复杂,采用了模块化设计和并行建造技术思路,这对光机模块快速准直带来了巨大技术挑战。针对光机模块精密准直近场、远场准直要求和光传输规律,首先建立了带角度误差的光传输模型,分析了入射光束、镜片角度偏差对模块整体出射激光准直精度影响规律。其次,根据误差分配理论,结合工程实际情况,优化分解了入射光及模块镜片准直误差,在精度和效率间寻找到了平衡点,使准直平台各基准小孔精度满足了模块准直要求,减小了各基准点工程实施难度。最后,通过齐次矩阵变换方法,实现了光轴、模块、准直平台相互关系的量化表征,把准直平台入射、出射基准小孔、镜片、模块定位件位姿关系统一到同一坐标系内,直接给出了位置和角度数据,为准直平台设计、搭建、高效维护提供了参考依据。该方法已经成功引用于神光Ⅲ激光装置,经实践验证,模块准直精度满足使用要求,达到了模块间光路快速对接目的,该方法同样适用于大型、复杂、模块化并行建造的其他科学工程,为快速建造和工程实施提供借鉴。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.*. Development of laser technology in research center of laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.  
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- 2 Shi Zhiquan, Wei Xiaofeng, Ma Chi, *et al.*. Beam position stability analysis in the large solid state laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(s1): 167-170.  
师智全, 魏晓峰, 马驰, 等. 大型固体激光器光束定位稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 167-170.
- 3 Shi Zhiquan, Peng Hansheng, Su Jingqin. Beam positioning error budget in ICF driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(2): 275-278.  
师智全, 彭翰生, 粟敬钦. ICF驱动器光束定位误差估计[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 275-278.
- 4 Sommer S C, Bliss E S. Beam positioning[C]. SPIE, 1998, 3492: 112-135.
- 5 Bonanno R E. Assembling and installing line-replaceable units for the National Ignition Facility[J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2866-2872.
- 6 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High power method of long-ranged laser spot position measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(07): 0708003.  
张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(07): 0708003.
- 7 Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photo pulsed heterodyne detection system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208004.  
罗韩君, 元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208004.
- 8 Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua, *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(12): 1425-1428.  
赵东峰, 戴亚平, 尹宪华, 等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1425-1428.
- 9 Sha Dingguo. Error Analysis and Evaluation of Measurement Uncertainty[M]. Beijing: China Measurement Press, 2003.



- 沙定国. 误差分析与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- 10 Lu Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.  
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- 11 Zhuang Dakui, Lin Zunqi, Guan Xiaopeng, *et al.*. Analysis and Calculation for the Ghost in SHENGUANG II High Power Laser System[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 582-585.  
庄大奎, 林尊琪, 管小鹏, 等. 神光 II 高功率激光系统中鬼像的计算与分析[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 582-585.
- 12 Zhou Weihu, Lan Yibing, Ding Shudan, *et al.*. Analysis and study of spatial coordinate transformation technique(1)[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1999, 19(4): 10-12.  
周维虎, 兰一兵, 丁叔丹, 等. 空间坐标转换技术的分析与研究(一)[J]. 航空计测技术, 1999, 19(4): 10-12.

栏目编辑: 韩 峰