

文章编号 1004-924X(2010)12-2624-09

# 大口径透镜姿态调整机构的支承分布设计

章亚男<sup>1</sup>, 沈丽丽<sup>1</sup>, 沈卫星<sup>2</sup>, 陈明仪<sup>1</sup>

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 为了设计大口径透镜姿态调整机构, 研究了三顶三拉调平结构布置方式的调节性能及其对受力变形和光束质量的影响。采用几何方法, 得出了三顶三拉结构在任意三角形布置下升高量与调整角度变化的关系, 定义了角度调整的相关系数; 利用有限元分析软件分析了 3 类支承点布置情况下调节平板的变形情况。分析结果表明, 三顶三拉调整机构具有调整量可计算的特点, 当调节平板的尺寸为 580 mm×570 mm×20 mm, 采用等腰三角形支承点布置方式时, 重力引起的最大变形为 12.51 μm。对采用了等腰三角形三顶三拉结构的透镜姿态调整机构进行了装校调试及打靶实验, 结果证实了该布点方式对姿态调整的有效性和调整完成后精度的稳定性。

**关键词:** 透镜; 调平机构; 调整性能; 支承分布

**中图分类号:** TH703; TH115 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2624

## Design of support distribution for attitude-adjusting mechanism of large lens

ZHANG Ya-nan<sup>1</sup>, SHEN Li-li<sup>1</sup>, SHEN Wei-xing<sup>2</sup>, CHEN Ming-yi<sup>1</sup>

- (1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** To design an attitude adjusting mechanism for large lenses, the adjusting characteristics of a three-pod adjusting structure and its effect on the force and deformation were analyzed. On the basis of the geometrical method, the relationship between the length of each pod and the plate angle variation was obtained under the arbitrary triangle layout of 3-pod adjusting structure, and the correlation coefficient was thus defined. Furthermore, the Finite Element Method (FEM) was used to analyse the deformation of the adjusting plate with three types of support layouts. The results show that the adjusting values of 3-pod mechanism can be calculated. For a plate with the size of 580 mm×570 mm×20 mm, the maximum deformation caused by gravity could be 12.51 μm while the isoscele triangle support layout is adopted. Finally, the attitude adjusting mechanism based on the 3-pod isoscele triangle support layout was calibrated and adjusted, the results prove that it is effective in attitude adjusting and accuracy stability in target-firing experiments.

**Key words:** lens; leveling mechanism; adjustment performance; support distribution

收稿日期: 2010-07-20; 修订日期: 2010-10-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA804229-1); 上海市教委“机械电子工程”创新团队资助项目

# 1 引言

大口径长焦距的光学调焦系统中,需要对透镜的光轴与机构的机械轴进行平行度调整,或称为透镜姿态调整,如应用于大功率激光打靶装置的终端光学组件的靶镜即需进行类似的姿态调整。激光打靶装置的基本原理是:高功率的激光束在靶场内按特定的光路传入,通过终端光学组件中的调焦模块对光束进行调焦,使激光会聚后能准确地集中在热核材料制成的靶丸某一特定部位上,在极短的时间内产生极高温和极高压,使被高度压缩的稠密等离子体在未扩散之前完成聚变反应,达到激光打靶的目的<sup>[1-3]</sup>。靶镜作为激光聚焦的最后光学元件,需将多路大口径强激光聚焦到靶丸数百微米腔孔内,其空间姿态会严重影响激光聚焦位置即打靶精度。为了保证微米级的打靶精度,在设计调焦模块中的大口径靶镜姿态调整机构时,需要重点考虑以下两个问题:(1)姿态调整机构或称调平机构,通常有 3 点支承、4 点支承、6 点支承等方案<sup>[4]</sup>。根据三点确定一个平面的原理,“三顶三拉”调平机构是采用较多的一种调平机构,但在对一个支承点调节时,会同时引起姿态的方位和俯仰变化<sup>[5-7]</sup>。对于以手动调整为主的三点调平机构,以往的研究主要就支承呈 120°等间隔等圆周分布的标准型调平机构给出调平原理和结论<sup>[8]</sup>。但由于结构的限制,支承点并不能满足此布置,因此需对支承点的布置形式进行分析,以得出支承点的升高量与调整角度变化的关系,并给出其角度调整的相关性,以保证调整时的快捷及解算。(2)大多数调平机构的工作平板都承受负载,由于重力等作用会引起工作平板的形变,使得以此为基面安装的导轨、丝杠相互之间的平行度受到影响,从而影响到光束对焦的精度,因此需考虑如何设计支承分布才能尽量减少这种影响。

基于上述因素,本文在分析已有的调平机构的基础上,研究了大尺寸透镜姿态调整机构采用“三顶三拉”调平形式时,其支承分布形式对结构合理设计、结构受力变形和光束质量的影响,目的在于有效地提高该项设计的针对性和有效性。

# 2 调焦模块、调平机构和靶球的关系

激光打靶装置的靶室部分,由靶球和多个终端光学组件组成,图 1 是一种由多路激光束来实现打靶的示意图。

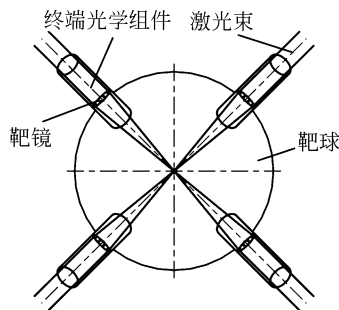


图 1 8 路激光束实现打靶的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of beams firing on a target by eight laser beams

如图 1 所示,每一个终端光学组件通过法兰安装在靶球上,终端光学组件中有沿主光轴可调整靶镜焦点位置的调焦模块。在调焦模块中,利用基座平板、调节平板和三顶三拉的调节螺钉组成调平机构来实现靶镜的姿态调整,如图 2 所示。

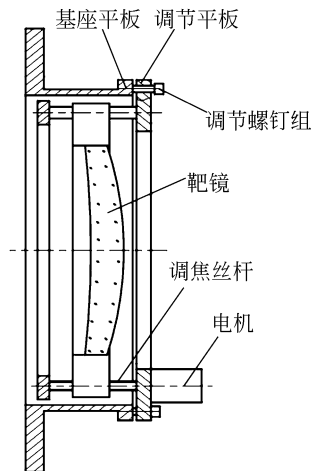


图 2 调焦模块示意图

Fig. 2 Focus adjustment module

调平机构的结构形式如图 3 所示,基座平板与调节平板之间通过三组螺栓连接,每一组螺栓中,两个螺栓起到拉的作用,中间一个球头螺钉完成顶的功能,一顶一拉相互配合,实现了各点支承

的双向位移调整。每一组螺栓形成“一顶两拉”的工作模式,整个调平机构属于“三顶三拉”工作模式。

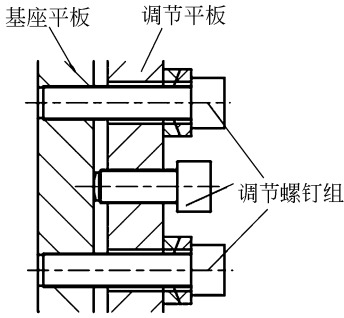


图 3 调平机构结构图

Fig. 3 Detailed structure of one adjusting support

### 3 布点形式与调整性能

#### 3.1 调平机构的几何模型

为了方便分析,在以后的行文中将“一顶二拉”的螺钉组作为一个点来简化处理,原因是与调整面的尺度相比,各螺钉组调节机构的局部尺度较小,可以简化成点。在三个调节节点的作用下,调节平板将相对于基座平板发生角度变化,即透镜的光轴相对于机械轴进行调整。为了方便描述在基座平板上分别设置正交的  $x$  轴和  $y$  轴,调节平板与  $x$  轴的夹角用  $\alpha$  表示,称为方位角;调节平板与  $y$  轴的夹角用  $\beta$  表示,称为俯仰角。坐标轴设置和调节角度定义如图 4 所示。 $\alpha, \beta$  只用一个箭头表示正、反方向。考虑调平机构的四种布点方式。调节平板  $ABCD$  的长和宽分别为  $L$  和  $H$ ,三个调节节点分别为(1)、(2)和(3)。图 5 为等腰三角形布置(对称布置),图 6 为任意三角形布置 I

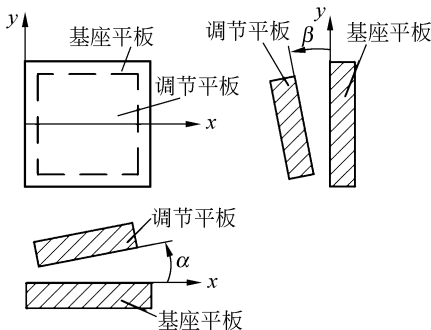


图 4 坐标轴设置和调平角度

Fig. 4 Coordinate setup and adjusting angle notation

(不对称布置),图 7 是图 6 的一个特例,为直角三角形布置,图 8 为任意三角形布置 II(不对称布置),支承点之间的尺寸见图。

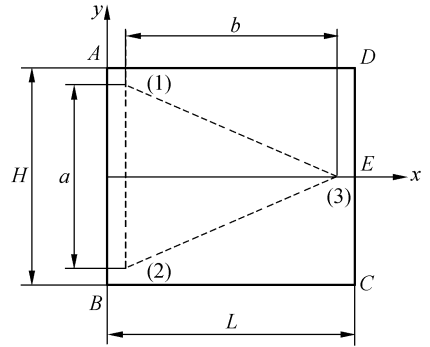


图 5 调平机构几何模型(等腰三角形布置)

Fig. 5 Geometric model of leveling mechanism (isosceles triangle layout)

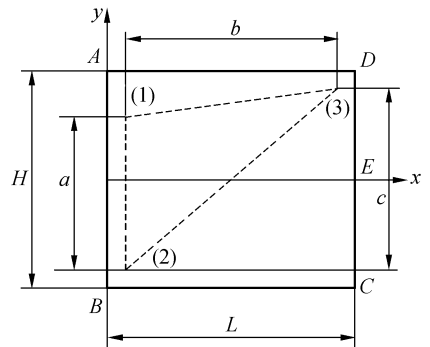


图 6 调平机构几何模型(任意三角形布置 I)

Fig. 6 Geometric model of leveling mechanism (general triangle layout I)

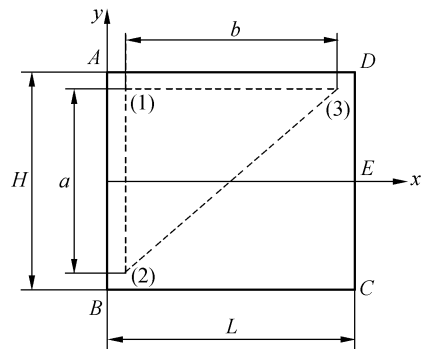


图 7 调平机构几何模型(直角三角形布置)

Fig. 7 Geometric model of leveling mechanism (right-angled triangle layout)



表 3 各支承点调节量与两角度增量的关系(任意三角形布置 II)

Tab. 3 Relationship between the adjustment quantity of each support and the 2-D angles

	方位角变化 $\Delta\alpha$	俯仰角变化 $\Delta\beta$	相关系数 $\rho$
支承点(1)升高量 $\Delta_1$	$-\arcsin\left[\frac{c\Delta_1}{K}\right]$	$-\arcsin\left[\frac{(b-d)\Delta_1}{K}\right]$	$\frac{\min[ c ,  b-d ]}{\max[ c ,  b-d ]}$
支承点(2)升高量 $\Delta_2$	$\arcsin\left[\frac{(c-a)\Delta_2}{K}\right]$	$-\arcsin\left[\frac{b\Delta_2}{K}\right]$	$\frac{\min[ c-a , b]}{\max[ c-a , b]}$
支承点(3)升高量 $\Delta_3$	$\arcsin\left[\frac{a\Delta_3}{K}\right]$	$\arcsin\left[\frac{d\Delta_3}{K}\right]$	$\frac{\min[a, d]}{\max[a, d]}$

(其中:  $K=a(b-d)+cd$ )

节量与两角度增量的关系。

表 3 是表 1 和表 2 的更为一般的情况,在表 3 中,若  $d=0, c=a/2$ ,则得到表 1 中等腰三角形的情况。若  $d=0$ ,则可以得到表 2 中的情况。

与某一支承点调节量相对应的相关系数  $\rho$  与结构参数  $a, b, c, d$  的取值有关,它的极限范围为  $0\sim 1$ ,反映了方位角和俯仰角在调节中的相关程度,因此一定意义上反映出调节工作需要花费的时间和精力。

为了形象地表示表 1~3 中的  $\rho$  与  $a/b$  之间的关系,考虑实际结构,取  $c=1.2a, d=0.7b$  为例(若  $c, d$  取值不同,也可得到类似图示),则支承

点(1)、(2)和(3)分别调整时,图 5~图 8 所示的调平机构几何模型所对应的相关系数与支承点相互位置参数之间的关系见图 9~图 11。

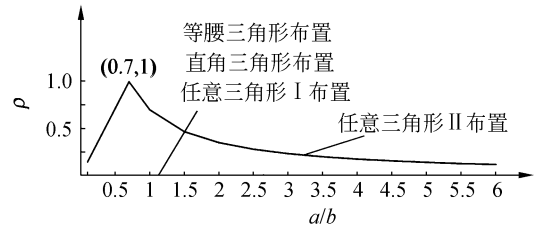


图 11 支承点(3)调整时  $\rho$  与支承点位置之间的关系

Fig. 11 Relationship of support pattern features with relevance coefficients(support 3)

考虑到实际结构中尺寸  $a$  和  $b$  相当,取  $a/b=0.75$  和  $a/b=1$  来分析,以  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  分别表示下标所示的标号支点调节时的相关系数,见表 4、5。

表 4 不同三角形支承形式下相关系数的比较( $a/b=0.75$ )

Tab. 4 Comparison of relationship coefficients on different 3-pod support configurations( $a/b=0.75$ )

支承形式	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
等腰三角形	0.375	0.375	0
直角三角形	0.75	0	0
任意三角形 I	0.9	0.15	0
任意三角形 II	0.33	0.15	0.93

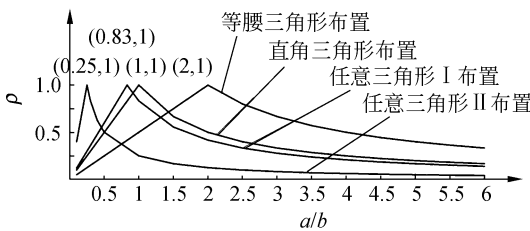


图 9 支承点(1)调整时  $\rho$  与支承点位置之间的关系

Fig. 9 Relationship of support pattern features with relevance coefficients(support 1)

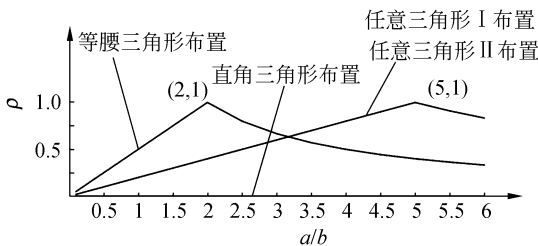


图 10 支承点(2)调整时  $\rho$  与支承点位置之间的关系

Fig. 10 Relationship of support pattern features with relevance coefficients(support 2)

表 5 不同三角形支承形式下相关系数的比较(a/b=1)

Tab.5 Comparison of relationship coefficients on different 3-pod support configurations(a/b=1)

支承形式	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
等腰三角形	0.5	0.5	0
直角三角形	1.0	0	0
任意三角形 I	0.83	0.2	0
任意三角形 II	0.25	0.2	0.7

从上表可以比较直观地看出,从支点调节引起的相关系数的程度(一定程度上对应调节之复杂程度)来看,等腰三角形布局 and 直角三角形布局的调节工作量相对较少。

### 4 支承点分布形式与调节平板的变形

调平机构的调节平板会承受负载及调节螺钉的支承力,引起调节平板的变形,从而使得安装在此平板上的导轨之间、导轨与丝杠螺母的轴线之间的平行度发生变化,影响靶镜调焦时的焦点位置,从而影响组件打靶精度。如:调焦模块中,调节平板尺寸为 580 mm×570 mm×20 mm,需承受靶镜框、透镜、导轨等组成的靶镜模块的负载。根据弹性力学的定义<sup>[9]</sup>,由于其面最小尺寸是其厚度的 5 倍以上,因此调节平板属于薄板,极易产生自重变形。因此,有必要通过优化支承跨距及各支承点的布置,使其影响最小。

取平板在水平状态下受重力作用的工况条件,通过 ANSYS 优化模块,建立平板的参数化有限元模型,采用 shell63 单元,材料为 LD10。

分别对图 5~8 所示的支承方式进行分析,在平板背面设置三个硬点表示支承点的位置,建立挠度约束<sup>[10-11]</sup>,得出与上述支承方式相对应的变形图,见图 12~15。

图 12 所示为当支承如图 5 呈等腰三角形布置时平板的重力变形图,可知:沿 x 方向,平板中间 E 区域的变形最大,沿着平板边缘其变形逐渐递减;沿 y 方向,平板的变形关于 x 轴对称。其中,三支承点附近的变形最小,为 0.04 μm;支承三角外的△ADE 与△BCE 区域的变形最大,为 12.51 μm。

图 13 所示为当支承如图 6 布置时的平板重力变形图,可知:平板的变形基本关于 AC 对称,其值沿 AC 逐渐递增。△BCD 的变形较大,其最

大变形发生在 C 点附近,其值为 88 μm;支承附近区域的变形较小,其值为 2.13 μm。

图 14 所示为当支承如图 7 布置时平板的重力变形图,可知:平板的变形基本关于 AC 对称,其值沿 AC 方向逐渐递增。△BCD 的变形较大,其最大变形发生在 C 点附近,其值为 87.6 μm;支承附近区域的变形最小,其值为 0.038 μm。

图 15 所示为当支承如图 8 布置时平板的重力变形图,可知:(2)(3)DC 所围区域的变形较大,其变形值由中间向外逐渐递增,变形最大处发生在 CD 边中间区域附近,其值为 10.6 μm;支承附近区域的变形较小,其值为 0.16 μm。

根据上述变形图,支承呈任意三角形 II 布置时,重力变形最小,等腰三角形布置形式的重力变形次之,两者的最大变形仅相差 1.91 μm,而任意三角形 I 与直角三角形布置形式的重力变形较大。

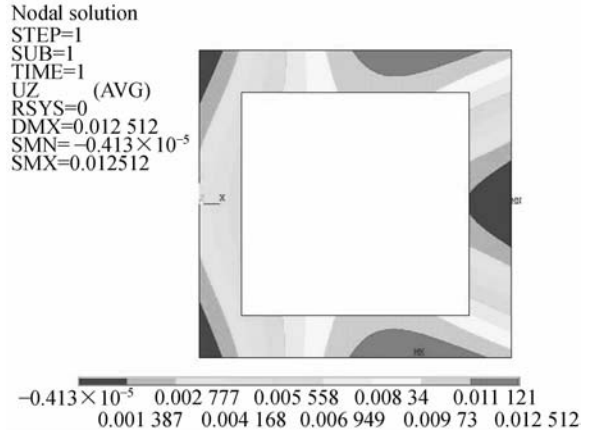


图 12 支承呈等腰三角形分布时的重力变形图

Fig. 12 Deformation induced by gravity with isosceles triangle support layout

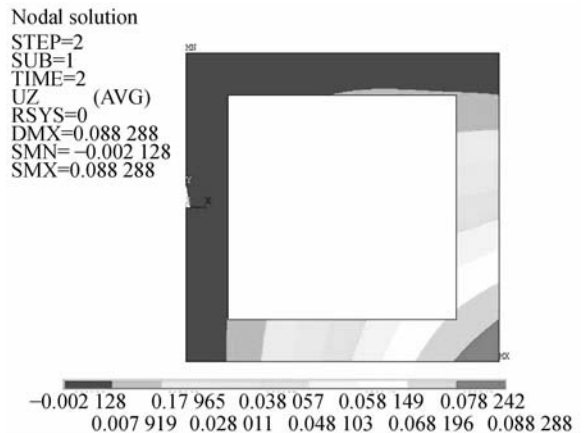


图 13 支承呈任意三角形 I 布置时的重力变形图

Fig. 13 Deformation induced by gravity with general triangle I support layout

Nodal solution

STEP=1  
SUB=1  
TIME=1  
UZ (AVG)  
RSYS=0  
DMX=0.087 648  
SMN=-0.384×10<sup>-5</sup>  
SMX=0.087 648



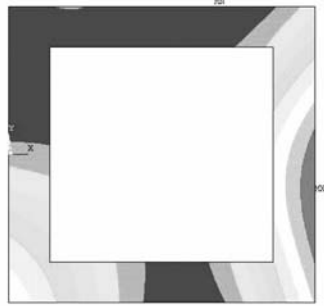
-0.384×10<sup>-5</sup> 0.019 474 0.038 953 0.058 431 0.077 909  
0.009 735 0.029 214 0.048 692 0.068 17 0.087 648

图 14 支承呈直角三角形布置时的重力变形图

Fig. 14 Deformation induced by gravity with right-angled triangle support layout

Nodal solution

STEP=1  
SUB=1  
TIME=1  
UZ (AVG)  
RSYS=0  
DMX=0.010 605  
SMN=-0.155×10<sup>-3</sup>  
SMX=0.010 605



-0.155×10<sup>-3</sup> 0.002 236 0.004 627 0.007 018 0.009 409  
0.001 04 0.003 431 0.005 823 0.008 214 0.010 605

图 15 支承呈任意三角形 II 布置时的重力变形图

Fig. 15 Deformation induced by gravity with general triangle II support layout

## 5 试验和测试

在综合参考调平机构调节复杂性和变形程度的基础上,对调焦模块中应用的调平机构进行了设计。图 16 所示为调平机构在调焦模块中的应用实例,设计中采用了等腰三角形的支承分布,支点位置的尺寸  $a=430\text{ mm}$ ,  $b=540\text{ mm}$ ,经平行光管检测,实际的调平调节分辨率小于  $2''$ 。

图 17 为星点检验示意图,其原理如下:放置在靶镜焦点位置的点光源通过靶镜后成平行光,经反射镜反射再经靶镜成像在焦点处,从位于焦点处的 CCD 上得到的星点图可反映出靶镜相应的变形情况。CCD 成像系统包括  $512\times 512$  阵列

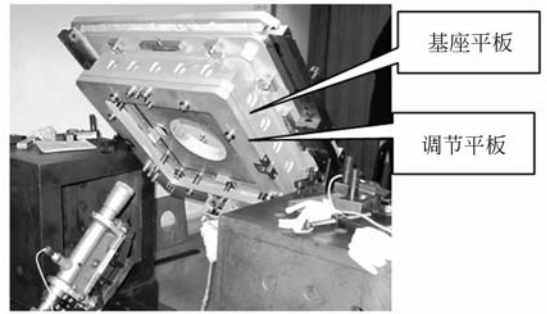


图 16 调平机构在调焦模块中的应用实例

Fig. 16 Application example of adjusting mechanism in focusing module

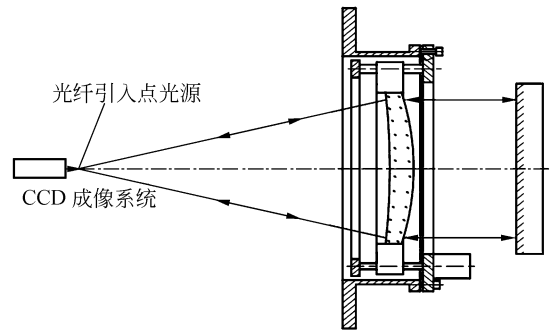


图 17 星点检验示意图

Fig. 17 Scheme of star-spot test

的 CCD 和放大倍率为 21.8 的显微物镜,用于检测图 16 所示的靶镜衍射极限。针对 400 mm 有效口径,焦距 2.2 m 的靶镜,当波长为 1 053 nm 时,计算得到其一倍衍射极限为  $11.583\text{ }\mu\text{m}$ ,对应 CCD 成像面上其尺寸为 25 pixel。实际测得的星点图如图 18 所示,其星点尺寸约为 70 pixel,相当于 2.8 倍衍射极限,小于整个激光驱动系统要



图 18 星点图

Fig. 18 Star-spot test

求的 10 倍衍射极限,满足系统要求,并经实际打靶实验,证实了所设计的调平机构能满足实际的使用要求。

## 6 结 论

本文对应用在透镜调整机构中的三顶三拉结构的调平性能、调节平板变形等方面进行了深入的分析,得到的主要结论为:角度调整性能与支承点升高量、布点构成的三角形特征尺寸有关系,当有一个边与调节平板的主轴方向一致时,俯仰角

和方位角的调节不发生耦合。从调节平板受重力后的变形角度看,变形量与支承边外的面积成正比,支承边外的面积越小,其变形量越小。在终端光学组件调焦模块姿态调整结构的设计时,充分综合了上述分析结果,做出了合理的支承点位置设计,在装校调试及相关实验中,均证实了该布点方式的姿态调整有效性和调整完成后精度的稳定性。

致谢:感谢课题组其他成员及合作单位上海光机所相关人员对本研究和课题进行的帮助和支持。

## 参考文献:

- [1] LINFORD R, BETTI R, DAHLBURG J, *et al.*. A review of the U. S. department of energy's inertial fusion energy program[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2003, 22(2): 93-126.
- [2] 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]. *中国工程科学*, 2001, 3(3): 1-7.  
PENG H SH, ZHANG X M, FAN D Y, *et al.*. Status of high-power solid-state lasers and engineering science[J]. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 1-7. (in Chinese)
- [3] 朱健强. 中国的神光——神光 II 高功率激光实验装置[J]. *自然杂志*, 2006, 28(5): 271-273.  
ZHU J Q. Shenguang-II high power laser facility [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(5): 271-273. (in Chinese)
- [4] 耿记波, 高云国, 吴延巽. 大型光电设备动基座自动支撑调平方法及结构[J]. *工程设计学报*, 2007, 14(5): 383-387.  
GENG J B, GAO Y G, WU Y X. Study on method and configuration for automatic supporting and leveling of big-scale photoelectric equipment's moved-groundwork[J]. *Journal of Engineering Design*, 2007, 14(5): 383-387. (in Chinese)
- [5] 姜伟伟, 高云国, 冯栋彦, 等. 大型光电设备基准平面自动调平系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 5(5): 1039-1045.  
JIANG W W, GAO Y G, FENG D Y, *et al.*. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 5(5): 1039-1045. (in Chinese)
- [6] 高云国. 大型光电设备载车三点液压调平支撑的研究[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(3): 106-110.  
GAO Y G. Research of three-hydraulic leveling bearing points for carrying vehicle of large-size optical and electrical instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3): 106-110. (in Chinese)
- [7] 史厚强. 基于三点支承的仪器调平[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 824-826.  
SHI H Q. Leveling of instrument based on three accept [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 824-826. (in Chinese)
- [8] ALEXANDER H SLOCUM. *Precision Machine Design* [M]. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1992.
- [9] 陆明万, 张雄, 葛东云. 工程弹性力学与有限元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
LU M W, ZHANG X, GE D Y. *Engineering Effort Elasticity and Finite Element Method* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 辛宏伟, 李景林, 关英俊, 等. 大口径光学反射镜球铰支撑方式尺寸稳定性分析[J]. *光学技术*, 2006, 32(Suppl.): 659-662.  
XIN H W, LI J L, GUAN Y J, *et al.*. Stability analysis to large aperture optics reflector with ball-hinge support means[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(Suppl.): 659-662. (in Chinese)

- [11] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.  
WANG F G, YANG H B, YANG F, *et al.*. Op-

timization and analysis for the axis supports position of the large aperture mirrors[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)

#### 作者简介:



**章亚男**(1962—), 女, 浙江绍兴人, 副研究员, 1982 年于浙江大学获得学士学位, 主要从事精密机械设计的研究。E-mail: ynzhang@shu.edu.cn



**沈卫星**(1970—), 男, 上海嘉定人, 高级工程师, 1992 年于上海科学技术大学获得学士学位, 主要从事高功率激光光学元件检测的研究。E-mail: wxshen@mail.shcnc.ac.cn



**沈丽丽**(1985—), 女, 上海人, 测量工程师, 2010 年于上海大学获得硕士学位, 主要从事精密机械测量技术与精密机械分析的研究。E-mail: lili-shen@163.com



**陈明仪**(1938—), 男, 浙江宁波人, 教授、博士生导师(已退休), 国家有突出贡献专家, 1962 年毕业于浙江大学光学精密仪器工程系, 长期从事工程检测中光学方法及技术的研究。E-mail: mychen@sh163.net.

#### ● 下期预告

## LED 在道路照明中的光效优势

金 鹏, 喻春雨, 周奇峰, 王一峰, 吴 娜

(北京大学 深圳研究生院 集成微系统科学与工程与应用重点实验室, 广东 深圳 518055)

以两种常用路灯光源和两种 LED 路灯光源为研究对象, 研究了道路照明环境中人眼处于的视觉状态, 进而通过 MOVE 模型求得 4 种路灯在中间视觉状态下的发光效率。与明视觉状态下的发光效率比较, LED 路灯和金属卤素路灯在中间视觉状态下的发光效率大大提高, 而高压钠灯发光效率有所降低。中间视觉状态下, 当环境照明亮度从  $0.03 \text{ cd/m}^2$  变化到  $0.1 \text{ cd/m}^2$  再变化到  $0.3 \text{ cd/m}^2$  时, 标准 LED 路灯的发光效率首先从  $131.2 \text{ lm/W}$  降到  $122.7 \text{ lm/W}$ , 然后又上升到  $140.5 \text{ lm/W}$ 。由于人眼视觉响应是随环境照明变化的, LED 路灯比常用路灯在中间视觉状态下的发光效率高, 并且可以通过光谱加强等优化方法得到发光效果令人满意的 LED 光源。