

## 激光光斑测试靶的参数估算

李佩军<sup>1</sup>, 胡林亭<sup>1</sup>, 曾嫦娥<sup>2</sup>, 樊丁丁<sup>1</sup>

(1. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:**激光照射精度外场测试中,随着载机航路的变化,照射在测试靶上的激光光斑位置和尺寸是不同的。针对测试靶参数选取问题,提出了一种估算方法,建立了测试靶参数的估算模型,满足了不同载机航路的测试靶参数计算需要,为合理设置测试靶提供了一种实用方法。试验结果表明,用该方法设置测试靶倾角、尺寸及十字线位置,可以测量全部激光光斑,为准确测量激光照射精度提供了依据。

**关键词:**激光照射精度;估算模型;测试靶;激光光斑

**中图分类号:**TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.08.004

## Parameter estimation of laser spot test target

LI Pei-jun<sup>1</sup>, HU Lin-ting<sup>1</sup>, ZENG Chang-e<sup>2</sup>, FAN Ding-ding<sup>1</sup>

(1. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China;  
2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In precision test of laser irradiation, the position and size of laser spot on the test target will change with the aircraft route. To properly set the target, parameter estimation method is proposed. The estimation model of test target parameters is built, and calculation requirement of test target parameters for different aircraft routes is met, which provides a feasible way for the target settings. Test results indicate that laser spot can be measured totally by setting the proper parameters, such as oblique angle, size and cross centre of the target board, which provide a reference for measuring laser radiation sensitivity accurately.

**Key words:** precision of laser irradiation; estimation model; test target; laser spot

### 1 引言

激光指示吊舱可挂载于多种载机,对目标照射激光,为激光制导武器指示目标。激光制导武器追踪目标上的激光光斑,因此激光照射精度直接影响激光制导武器命中精度,需准确测量。

目前通常采用摄像法测量靶标上激光光斑能量分布,确定激光光斑照射位置<sup>[1]</sup>。为客观、准确评定激光照射性能,选择均匀的、具有漫反射特性的平面靶板做测试靶。因激光有束散角和照射偏差,激光照射方向随载机的运动而变化,为测量全部激光光斑,应确定合适的测试靶尺寸及架设倾角,同时测

试靶的尺寸也影响着激光测量系统的视场参数,在激光测量系统的论证中也需确定合理的测试靶尺寸。

### 2 问题提出

#### 2.1 激光光斑测量要求

激光制导武器通过探测目标上激光光斑位置,产生误差信号,控制导弹追踪目标,因此激光照射偏差影响制导武器的命中精度。目前激光导引头的探测器为四象限或双四象限结构,以探测的激光光斑能量质心位置为光斑中心,即制导武器要攻击的目标点,因此测试时以激光光斑能量质心位置作为光

斑位置<sup>[2]</sup>,且要测量完整的光斑。

吊舱和激光照射光斑质心连线与吊舱和测试靶十字线中心(照射瞄准点)连线的夹角就是照射偏差角,表示了激光照射偏差大小。激光照射精度是吊舱在一次激光照射过程中,激光光斑能量质心相对测试靶十字线中心的散布值<sup>[2]</sup>。

激光制导武器实施一次攻击,需持续照射十几秒或更长时间,照射在目标上的光斑位置与尺寸不断变化,因此,在激光照射精度试验中,需要测量每个激光光斑相对测试靶十字线中心的散布值,来计算激光照射精度。

### 2.2 测试靶的选取

采用摄像法测量激光光斑,测试靶形状和反射均匀性将影响测量精度。测试靶形状影响激光的反射方向,形状复杂的测试靶激光反射模型建立难度大,计算复杂,为减小测试难度和提高测量精度,我们选取平面靶板做测试靶。测试靶反射均匀性将影响激光光斑质心位置的测量,因此选择反射率一致的朗伯漫反射体。在一定的测试条件下,控制激光测试角度,可用均匀的激光漫反射材料代替朗伯漫反射体。测试靶尺寸影响测量光斑的完整性,测试靶尺寸应足够大。实际测试时,为减少试验消耗,应根据航路与激光指示吊舱参数设置测试靶尺寸。

不同的航路高度、航路捷径和照射距离,照射在测试靶上的光斑形状是不同的,选择合理的测试靶倾角,用最小的测试靶测量全部光斑。

由上述分析可知,激光照射精度测试靶为均匀的、具有漫反射特性的平面靶板。测试靶的最佳尺寸和倾角由航路和激光照射性能决定。

## 3 测试靶参数估算方法

### 3.1 坐标系定义

#### 3.1.1 地理坐标系

地理直角坐标系为  $OXYZ$ ,  $OY$  轴指向正北,  $OX$  轴指向正东,  $OXY$  面与水平面平行。  $OX$  轴、  $OY$  轴与  $OZ$  轴构成右手直角坐标系。

#### 3.1.2 测试靶坐标系

以测试靶十字线中心为坐标原点  $O'$  建立测试靶直角坐标系  $O'X'Y'Z'$ ,  $O'X'$  轴指向东,  $O'Y'$  轴与  $O'X'$  轴垂直,沿测试靶平面指向斜上。  $O'X'$  轴、  $O'Y'$  轴与  $O'Z'$  轴构成右手直角坐标系。

### 3.2 测试靶参数估算方法

#### 3.2.1 坐标变换

为计算方便,设测试靶坐标系原点  $O'$  与地理坐标系原点  $O$  重合,  $Z'O'Y'$  面与  $ZOY$  面重合,则  $X'$  轴

与  $X$  轴平行。设测试靶倾角为  $\omega$ ,  $O'$  点坐标为  $(0, 0, 0)$ 。测试靶尺寸计算示意图见图 1。

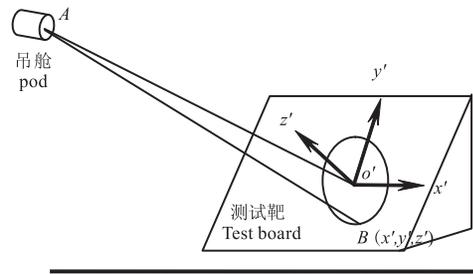


图1 测试靶尺寸计算示意图

Fig. 1 The calculation diagram of the test board size

地理坐标系  $OXYZ$  到测试靶坐标系  $O'X'Y'Z'$  的变换公式<sup>[3]</sup>为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 3.2.2 激光光斑散布范围

设测试靶上的激光光斑晃动符合正态分布,最大晃动范围为激光照射精度的 3 倍<sup>[4]</sup>,考虑激光有一定的束散角<sup>[5]</sup>,则激光光斑的晃动角范围为:

$$\tau = 3\theta_0 + \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

式中,  $\theta_0$  为激光照射精度;  $\phi$  为激光束散角。

激光光斑的散布范围是以瞄准轴为轴心、锥角为  $\tau$  的圆锥。该圆锥与测试靶的交绘区域是激光光斑的晃动范围,测试靶上的交绘区域为一头大一头小的梨形形状,如图 2 所示。

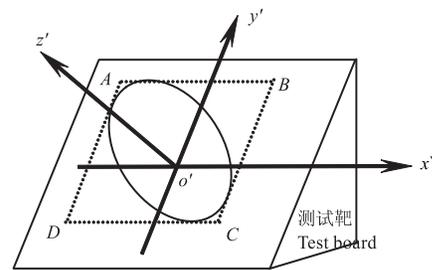


图2 测试靶上交绘区域形状示意图

Fig. 2 The schematic diagram of laser spot shape

当吊舱航路捷径相对照射距离较小、且瞄准轴与测试靶法线夹角较小时,测试靶上交绘区域近似为椭圆形状。由图 2 可知,完整接收激光光斑的区域为长方形  $ABCD$ ,  $AB \parallel ox'$ ,  $AD \parallel oy'$ 。长方形  $ABCD$  的四个边与激光光斑晃动轮廓线相切,切点就是激光光斑晃动轮廓线在  $x'$  轴方向和  $y'$  轴方向的极值点。从理论上说,测量激光照射精度时,测试靶能覆盖该交绘区域,就可以接收全部激光信息。因此,计算出该交绘区域,就可以确定合适的测试靶

尺寸。

### 3.2.3 测试靶尺寸估算

设吊舱照射高度为  $h$ ，照射航路捷径为  $l$ ，照射斜距为  $s$ 。测试靶朝南，载机由南向北飞行，吊舱在地理坐标系中坐标为  $(l, -\sqrt{s^2 - l^2 - h^2}, h)$ 。吊舱在测试靶坐标系中坐标  $(a, b, c)$ ，由坐标变换公式(1)可计算得：

$$\begin{cases} a = l \\ b = -\sqrt{s^2 - l^2 - h^2} \cos \omega + h \sin \omega \\ c = \sqrt{s^2 - l^2 - h^2} \sin \omega + h \cos \omega \end{cases} \quad (3)$$

从图1可知，激光光束绕瞄准轴  $AO'$  的最大晃动角  $\tau$  为一定值，可由式(2)计算。 $\tau$  为瞄准轴  $AO'$  与激光光斑边缘线  $AB$  的夹角，测试靶上交绘区域轮廓线上任一点坐标为  $(x', y', z')$ ，由两条直线夹角计算公式<sup>[6]</sup> 可得：

$$\cos \tau = \frac{a(a-x') + b(b-y') + c(c-z')}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \sqrt{(a-x')^2 + (b-y')^2 + (c-z')^2}}$$

轮廓线在  $X'O'Y'$  平面内的约束条件为  $z' = 0$ ，则由上式得：

$$s^2 \cos^2 \tau [(a-x')^2 + (b-y')^2 + c^2] - (ax' + by' - s^2)^2 = 0 \quad (4)$$

式中， $s^2 = a^2 + b^2 + c^2$ 。

对轮廓线上一点，当  $\frac{dx'}{dy'} = 0$ ， $x'$  取得最大值、最小值。上式对  $x'$  求导得：

$$y' = \frac{abx' - bs^2 \sin^2 \tau}{s^2 \cos^2 \tau - b^2} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)得  $x'$  的二次方程：

$$(c^2 - s^2 \sin^2 \tau)x'^2 + (2as^2 \sin^2 \tau)x' + s^2 \sin^2 \tau (b^2 - s^2) = 0 \quad (6)$$

方程的两个根  $x'_1$  和  $x'_2$  是  $x'$  的最大值、最小值，可得：

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{-as^2 \sin^2 \tau + cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - b^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \\ x'_2 = \frac{-as^2 \sin^2 \tau - cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - b^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \end{cases} \quad (7)$$

激光光斑在  $x'$  轴方向的晃动范围为：

$$\begin{aligned} \Delta x' &= |x_1 - x_2| \\ &= \frac{2cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - b^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \end{aligned} \quad (8)$$

同理可得  $y'$  二次方程为：

$$(c^2 - s^2 \sin^2 \tau)y'^2 + (2bs^2 \sin^2 \tau)y' + s^2 \sin^2 \tau (a^2 - s^2) = 0 \quad (9)$$

方程的两个根  $y'_1$  和  $y'_2$  是  $y'$  的最大值、最小值，可得：

$$\begin{cases} y'_1 = \frac{-bs^2 \sin^2 \tau + cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - a^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \\ y'_2 = \frac{-bs^2 \sin^2 \tau - cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - a^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \end{cases} \quad (10)$$

激光光斑在  $y'$  轴方向的晃动范围为：

$$\Delta y' = \frac{2cssin\tau \sqrt{s^2 \cos^2 \tau - a^2}}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \quad (11)$$

测试测试靶的尺寸长为  $\Delta x'$ ，高为  $\Delta y'$ 。

### 3.2.4 测试靶十字线的设置

由式(7)、式(10)可知，当吊舱瞄准轴与测试靶面法线不平行时， $x'_1 \neq x'_2$ ， $y'_1 \neq y'_2$ ，激光光斑相对测试靶中心的散布是不对称的，这个现象由后面表1和表2数据可知。

由式(7)和式(10)得  $x'_1$  与  $x'_2$  的差  $\delta x'$ 、 $y'_1$  与  $y'_2$  的差  $\delta y'$  为：

$$\begin{cases} \delta x' = \frac{2as^2 \sin^2 \tau}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \\ \delta y' = \frac{2bs^2 \sin^2 \tau}{c^2 - s^2 \sin^2 \tau} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)和式(10)，当激光指示距离  $s$  和测试靶倾角  $\omega$  一定时， $\delta x' \propto a$ ， $\delta x' \propto \tau$ ， $\delta y' \propto b$ ， $\delta y' \propto \tau$ ，激光光斑散布不对称性正比于航路捷径  $l$ 、高度  $h$  和激光晃动角  $\tau$ 。高度  $h$  对  $\delta x'$  的影响相对较小，航路捷径  $l$  对  $\delta y'$  的影响相对较小。

因此当航路捷径  $l$  和激光晃动角  $\tau$  较大时，为节约测试靶材料、取得最佳测试效果，测试靶十字线应偏心设置，即十字线中心与测试靶中心不重合，偏心位置可根据式(7)和式(10)计算。

当航路捷径  $l$ 、高度  $h$  相对激光指示距离  $s$  较小及激光晃动角  $\tau$  较小时，可忽略测试靶十字线偏心设置问题。

## 4 测试靶尺寸估算实例

### 4.1 计算参数

根据吊舱的激光照射参数和使用要求，测试靶尺寸计算参数归纳为：

- a. 最大激光照射距离:15 km;
- b. 激光照射精度:0.2 mrad(1 $\sigma$ );
- c. 激光束散角:0.5 mrad;
- d. 激光照射高度3~6 km;
- e. 照射目标的最大航路捷径:1 km。

#### 4.2 测试靶尺寸计算

在最大常用激光照射距离为 15 km 时, 航路捷径为 1 km, 激光照射高度为 3 km 或 6 km 时, 完整测量激光光斑的最小测试靶尺寸和倾角是不同的。根据式(8)和式(11)分别计算出最小测试靶尺寸与倾角和激光照射高度的关系, 选择最佳测试靶尺寸, 满足两种激光照射高度的测试要求。

按照上述吊舱最大激光照射距离和航路捷径, 计算出激光照射光斑晃动范围和测试靶尺寸, 具体计算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 吊舱 3 km 高度照射时测试靶尺寸和倾角

Tab. 1 The target board size and tilt angle when the pod height is 3 km

$\omega/(\circ)$	$x'_1/m$	$x'_2/m$	$\Delta x/m$	$y'_1/m$	$y'_2/m$	$\Delta y/m$
40	12.80	-12.80	25.59	16.29	-16.27	32.55
45	12.79	-12.79	25.58	15.29	-15.27	30.56
50	12.79	-12.79	25.57	14.51	-14.49	29.00
55	12.78	-12.78	25.57	13.90	-13.89	27.79
60	12.78	-12.78	25.56	13.44	-13.44	26.88
65	12.78	-12.78	25.56	13.11	-13.11	26.22
70	12.78	-12.78	25.56	12.89	-12.89	25.78
75	12.78	-12.78	25.56	12.77	-12.77	25.55
80	12.78	-12.78	25.56	12.75	-12.76	25.51
85	12.78	-12.78	25.56	12.83	-12.84	25.67
90	12.78	-12.78	25.56	13.01	-13.02	26.03

表 2 吊舱 6 km 高度照射时测试靶尺寸和倾角

Tab. 2 The target board size and tilt angle when the pod height is 6 km

$\omega/(\circ)$	$x'_1/m$	$x'_2/m$	$\Delta x/m$	$y'_1/m$	$y'_2/m$	$\Delta y/m$
40	12.78	-12.79	25.57	14.24	-14.22	28.46
45	12.78	-12.78	25.57	13.70	-13.69	27.38
50	12.78	-12.78	25.56	13.29	-13.29	26.58
55	12.78	-12.78	25.56	13.01	-13.00	26.01
60	12.78	-12.78	25.56	12.83	-12.83	25.66
65	12.78	-12.78	25.56	12.75	-12.75	25.51
70	12.78	-12.78	25.56	12.77	-12.78	25.55
75	12.78	-12.78	25.56	12.89	-12.90	25.79
80	12.78	-12.78	25.56	13.12	-13.12	26.24
85	12.78	-12.78	25.56	13.45	-13.46	26.91
90	12.78	-12.78	25.57	13.91	-13.92	27.83

由表 1 和表 2 的计算数据可知, 兼顾吊舱 3 ~ 6 km 照射高度, 满足最大照射距离测试要求的最佳测试靶尺寸为 25.5 m × 25.8 m, 倾角为 70°。

#### 5 结论

本文通过对激光光斑测量要求、照射精度定义和测试靶的参数分析, 提出了激光光斑测试靶的参数估算方法, 建立了测试靶参数估算模型, 并编制了相应的计算程序, 满足了激光照射精度试验的测试需求。该方法应用于某型吊舱试验, 完成了激光照射精度的测试。试验结果表明: 通过合理设置测试靶倾角、尺寸及十字线位置, 可以测量全部激光光斑, 减小了漫反射靶的尺寸, 降低了测试靶布设难度, 同时为激光光斑测试设备指标的论证提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] HU Linting, LU Xiankui, JIN Junkun, et al. CCD. Laser facula measurement with CCD. [J]. Laser Technology, 2001, 25(2): 154 - 155. (in Chinese)  
胡林亭, 卢显葵, 金俊坤, 等. CCD 测量激光光斑方法研究. [J]. 激光技术, 2001, 25(2): 154 - 155.
- [2] HU Linting. GJB 7059 - 2010. Test procedures for finalize the design of laser irradiation pod[S]. Beijing: The General Armament Department Military Standard Publishing Department, 2010. (in Chinese)  
胡林亭. GJB 7059 - 2010. 激光照射吊舱定型试验规程[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010.
- [3] H Goldstein. Classical mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1986: 170 - 174. (in Chinese)  
H 戈德斯坦. 经典力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 170 - 174.
- [4] FEI Yetai. Error theory and data processing[M]. Beijing: China Machine Press, 1981: 15. (in Chinese)  
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 15.
- [5] LI Gang, DONG Wei, XU Chunmei, et al. Study on digital method to measure divergence angle of laser beam rider guidance[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(3): 231 - 232. (in Chinese)  
李刚, 董伟, 徐春梅, 等. 驾束制导仪激光束散角的数字化检测方法研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(3): 231 - 232.
- [6] The Mathematics Department of Tongji University. Advanced mathematica [M]. Beijing: Higher Education Press, 1996: 427. (in Chinese)  
同济大学数学教研室. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 427.