

文章编号: 1001-3806(2008)06-0670-03

## 激光监测系统测量精度的检测方法

胡林亭, 史德民, 李佩军, 任成才  
(中国白城兵器试验中心, 白城 137001)

**摘要:** 激光监测系统用于测量靶标上激光光斑重心位置, 为了检测其测量精度, 分析了该系统的测量原理, 提出了采用激光标准模拟靶的检测方法。根据激光标准模拟靶漫反射率的测量方法及结果, 应用数理统计方法和误差理论, 建立了激光标准模拟靶的测量误差模型, 估算了激光标准模拟靶的检测量精度, 现激光标准模拟靶已成功用于激光监测系统的验收。试验结果表明, 激光标准模拟靶检测精度高, 是一种经济实用、操作性好的新方法。

**关键词:** 测量与计量; 激光标准模拟靶; 激光光斑模拟; 检测方法

**中图分类号:** TN206 **文献标识码:** A

### Test method of the measurement precision of the laser inspection system

HU Lin-ting, SHI De-min, LI Pei-jun, REN Cheng-cai  
(Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

**Abstract:** The laser inspection system was applied to measure the focus location of laser facula on the target. The measurement principle was analysed in order to test the measurement precision of the laser inspection system and the laser standard simulation target was applied in the test. According to the measurement principle of the system, the test principle and method of the laser standard simulation target was elaborated. Considering the testing method and results in measuring the brim echo rate of the laser standard simulation target, the measurement error model was established and the measurement precision was estimated under the statistic method and error theory. The laser standard simulation target was successfully used in the check and acceptance of the laser inspection system. The conclusion made from the test result is that the laser standard simulation target is of high accuracy and the test method is economically and operationally excellent.

**Key words:** measurement and meterage; laser standard simulation target; laser facula simulation; test method

## 引 言

激光照射精度制约半主动激光制导武器的命中精度。激光监测系统可用于测量靶标上激光光斑重心位置, 评定激光照射器的照射精度, 因此, 激光监测系统的测量精度需要检测<sup>[1-8]</sup>。

本文中介绍的激光监测系统测量精度高, 目前国内未有用于检测的 1.06 $\mu\text{m}$  激光 (简称激光) 标准光源, 也未同类设备进行比对测试。通过分析其测量原理, 提出了用阳光做光源、用激光模拟靶代替激光标准光源进行检测的方法, 完成了激光监测系统测量精度的检测。

### 1 激光光斑的测试原理

#### 1.1 激光监测系统的测试原理

激光监测系统主要由电荷耦合器件 (charge coupled

device, CCD), 1.06 $\mu\text{m}$  窄带及图像采集处理计算机等组成。照射在靶板上的激光脉冲具有空间域和时域分布特性。成像在 CCD 像元 (简称像元) 上的激光光斑是空间域分布, 像元对激光脉冲的响应过程是时域分布。

测量激光照射精度时采用均匀漫反射材料制造的平面靶板, 激光监测系统拍摄照射在靶板上的激光光斑。在一个激光照射过程中, 阳光是均匀分布的, 可认为未测到激光的像元灰度值是相同的。在时间为  $T$  的一个激光脉冲测量过程中,  $\rho$  为靶板漫反射率, 像元响应系数为  $\beta$ , 阳光能量函数为  $E_s(t)$ , 激光能量函数为  $E_l(t)$ , 激光脉宽为  $T_1$ , 第  $i$  个像元总响应灰度值为  $I_i'$ , 则<sup>[9]</sup>:

$$I_i' = I_i + I_0 \quad (1)$$

$$I_0 = \rho\beta \int_0^T E_s(t) dt \quad (2)$$

$$I_i = \rho\beta \int_0^{T_1} E_l(t) dt \quad (3)$$

式中,  $I_0$  为背景灰度值, 是像元对阳光的响应灰度值, 等于未收到激光的像元灰度值。  $I_i$  为第  $i$  个像元对激光响应灰度值, 是激光光斑位置的函数。测量时以  $I_0$

作者简介: 胡林亭 (1964-), 男, 高级工程师, 主要从事激光测试技术方面的研究工作。

E-mail: qitiandasheng0002@sina.com

收稿日期: 2007-09-04; 收到修改稿日期: 2008-05-05

为阈值,当  $I_i' > I_0$  时,接收到激光光斑,当  $I_i' \leq I_0$  时,是阳光背景。CCD (加装  $1.06\mu\text{m}$  窄带)对  $1.06\mu\text{m}$  连续光与  $1.06\mu\text{m}$  激光脉冲的响应是一致的,用阳光做光源模拟激光光斑在原理上是正确的。

以 CCD 像面中心为原点建立直角坐标系,像元坐标为  $(x_i, y_i)$ ,则激光光斑重心坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum x_i \times I_i}{\sum I_i}, (I_i' \leq I_0, I_i = 0) \\ y = \frac{\sum y_i \times I_i}{\sum I_i}, (I_i' > I_0, I_i = I_i' - I_0) \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 激光模拟靶的构成

像元响应系数的线性行影响激光监测系统测量精度,可选用不同漫反射率材料模拟光斑,提高检测的置信度。用低漫反射率(对  $1.06\mu\text{m}$  光波,下同)材料做固定靶板,高漫反射率材料做激光光斑模拟靶板(简称光斑靶板),在阳光下产生暗背景亮图形的模拟激光光斑,实现检测要求。光斑靶板为方形( $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ )和圆形( $\varnothing 30\text{cm}$ ),可多块组合使用。激光模拟靶上设置十字线,修正测量系统光轴与靶板法线不平行的影响。激光模拟靶结构见图 1。

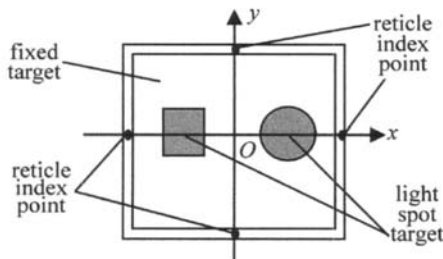


Fig 1 The structure of the laser standard simulation target

### 1.3 激光模拟靶的原理

设固定靶板漫反射率  $\rho_0$ ,光斑模拟靶板漫反射率  $\rho_i$ ,因  $\rho_0 < \rho_i$ ,由(2)式~(4)式激光模拟靶模拟光斑重心坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum x_i \times \rho_i}{\sum \rho_i} \\ y = \frac{\sum y_i \times \rho_i}{\sum \rho_i} \end{cases} \quad (5)$$

(5)式是(4)式的一种表达形式,说明激光模拟靶模拟光斑重心位置等于激光模拟靶漫反射率重心位置,测量模拟靶板漫反射率就能够计算模拟光斑重心位置。因  $1.06\mu\text{m}$  红外光源造价高,用均匀性好的阳光作光源。经测试,阳光光强满足检测要求。

## 2 激光标准模拟靶精度分析

### 2.1 误差分析

根据激光模拟靶检测原理,主要误差为光斑靶板

定位误差和光斑靶板漫反射率重心位置误差。光斑靶板尺寸及位置误差不大于  $0.1\text{mm}$ ,安装误差不大于  $0.5\text{mm}$ ,因此光斑靶板定位误差  $\sigma_r \leq 0.6\text{mm}$ 。

### 2.2 光斑靶板漫反射率重心位置误差

光斑靶板漫反射率重心位置误差主要由材料喷涂不均匀性引起。受漫反射率测量仪(探测器口径为  $\varnothing 10\text{mm}$  圆孔)制约,只能测量光斑靶板各小区域的平均漫反射率。以方形光斑靶板为例,将光斑靶板均分为  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  小方格,均分方格数为  $30 \times 30$ ,测量值是小方格平均漫反射率。由光斑靶板随机抽样测量值可知,漫反射率的不均匀性是一种离散分布,不是正态分布,其数学期望  $\xi = 299.3$ ,均方差为  $\sigma = 1.36$ 。

实际喷涂是不均匀的,每行和每列方格漫反射率均值存在散布误差。每列 30 个方格漫反射率均值  $\xi$  的均方差为  $\sigma_\xi = 0.248$ 。假设每列方格漫反射率重心为该列中心点时,存在数学模型误差,设该误差是正态分布,则每列方格漫反射率重心位置误差为  $\sigma_r = 1.67\text{mm}$ 。

同理可得每行方格漫反射率均值的均方差和漫反射率重心位置误差。

### 2.3 光斑靶板漫反射率重心位置误差模型

以靶板中心  $O$  为原点,建立直角坐标系  $x-O-y$ 。每列方格数为  $n$ ,方格尺寸为  $b \times b$ ,每列方格漫反射率重心位置  $x$  坐标为  $x_r$ ,可得光斑靶板漫反射率重心位置  $x$  坐标为:

$$x = \frac{\sum x_r \times \xi}{\sum \xi} \quad (6)$$

考虑每块光斑靶板形状对称,且  $\sigma_\xi \ll \xi$ ,考虑极限情况,由(6)式和函数误差计算公式,光斑靶板漫反射率重心位置  $x$  误差  $\sigma_x$  为:

$$\sigma_x^2 = \sigma_r^2 + n^2 b^2 \left( \frac{\sigma_\xi}{\xi} \right)^4 \quad (7)$$

同理可得光斑靶板漫反射率重心位置  $y$  的误差。因光斑靶板对称分布,方形光斑靶板漫反射率重心位置误差  $\sigma_s$  为:

$$\sigma_s^2 = \sigma_r^2 + n^2 b^2 \left( \frac{\sigma_\xi}{\xi} \right)^4 \quad (8)$$

计算可得方形光斑靶板漫反射率重心位置误差为  $1.67\text{mm}$ 。

### 2.4 两块光斑靶板组合使用时漫反射率重心位置误差估算

方形光斑靶板和圆形光斑靶板相对模拟靶中心漫反射率重心位置误差为:  $\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{1.67^2 + 0.6^2} = 1.78\text{mm}$ 。靶板 1 (面积  $S_1$ 、漫反射率  $\rho_1$ 、漫反射率误差  $\Delta\rho_1$ 、距中心  $O$  距离  $L_1$ ) 和靶板 2 (面积  $S_2$ 、漫反射率

$\rho_2$ 、漫反射率误差  $\Delta\rho_2$ 、距中心  $O$  距离  $L_2$ ) 组合使用时, 误差  $\Delta L$  估算如下。

考虑极限情况, 两块光斑靶板漫反射率重心偏向同一侧时, 适当简化后误差  $\Delta L$  为:

$$\Delta L = \frac{|\rho_1 S_1 \Delta L_1| + |L_1 S_1 \Delta \rho_1| + |\rho_2 S_2 \Delta L_2| + |S_2 L_2 \Delta \rho_2|}{\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2} \quad (9)$$

设靶板 1 为方形低漫反射率, 靶板 2 为圆形高漫反射率,  $\rho_1 = 0.642$ ,  $\Delta\rho_1 = 3.7 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_2 = 0.953$ ,  $\Delta\rho_2 = 5.5 \times 10^{-4}$ ,  $L_1 = L_2 = 0.3\text{m}$ ,  $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 1.78\text{mm}$ , 两块组合使用时, 由 (9) 式得激光模拟靶漫反射率重心位置误差  $\Delta L = 1.79\text{mm}$ 。激光模拟靶精度满足检测要求。

为使激光模拟靶工作在漫反射区域, 使用时应控制靶板与阳光夹角和靶板与激光监测系统夹角皆在 45 内, 保证测量精度。

### 3 结论

CCD (加装  $1.06\mu\text{m}$  窄带) 测量  $1.06\mu\text{m}$  连续光能量分布与  $1.06\mu\text{m}$  激光能量分布在原理上是一致的, 精度是相等的; 用阳光做光源, 模拟光斑重心与其漫反射率重心位置一致, 这两点是激光模拟靶的理论基础, 使分析和计算激光模拟靶的检测精度变得简单易行。

使用阳光作光源, 用激光模拟靶检测激光监测系

统测量精度的方法科学可行。该方法操作简单易行, 检测精度高, 不仅仅局限于波长  $1.06\mu\text{m}$  激光监测系统的标定, 也适用于其它波长的基于 CCD 器件的激光监测系统, 为此类激光监测系统提供了一种普遍适用的外场检测方法。

### 参考文献

- [1] WANG W, CHEN H X. Inhibiting noise of light spot image [J]. Laser Technology, 2007, 31 (1): 55-56 (in Chinese).
- [2] GONG H P, LÜ Zh W, LN D Y. CCD digital image preprocessing in measurement of laser beam intensity distribution [J]. Journal of Laser Optoelectronics · Laser, 2007, 18 (1): 125-126 (in Chinese).
- [3] WANG Ch Y, LI J Sh. Detection of laser spot drift [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28 (2): 205-207 (in Chinese).
- [4] WAN D A. The technology of high accuracy measurement using laser beam as a straight [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 2-12 (in Chinese).
- [5] WANG Q Y. Application technology of CCD [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000: 120-147 (in Chinese).
- [6] ZOU W J, ZHU GL, WU X B. Angle measuring system of laser on array CCD [J]. Opto-electronic Engineering, 2006, 33 (10): 92-94 (in Chinese).
- [7] FU Y G, DIX, LU Zh Y. Method of target laser reflectivity measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (6): 1215-1216 (in Chinese).
- [8] MAO Ch Q, WANG B, FU M Y. Real time image tracking system for moving targets by CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (3): 310-313 (in Chinese).
- [9] HU L T, LU X K, JN J K, *et al* Laser facula measurement with CCD [J]. Laser Technology, 2001, 25 (2): 154-155 (in Chinese).
- [10] COLLINS R L, BROWN K P, GARDNER C S. Polar stratospheric clouds at the south pole in 1990s: lidar observation and analysis [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98 (1): 1001-1010.
- [11] KLETT J. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl Opt, 1981, 20 (2): 211-220.
- [12] RUSSEL P B, SWISSER T J, MCCORMICK M P. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements [J]. Appl Opt, 1979, 18 (22): 3783-3797.
- [13] YN H. Atmospheric radiation basic [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993: 144-145 (in Chinese).

(上接第 669 页)

- [3] ZHAO X J, CHEN Ch H, YUAN T, *et al* Lanzhou aerosol optical depth in winter and their relation with visibility [J]. Plateau Meteorology, 2005, 24 (4): 617-622 (in Chinese).
- [4] BAI Y B, SHI G Y, KOCHIT, *et al* Lidar observations of atmospheric aerosol properties over Lhasa [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24 (4): 559-567 (in Chinese).
- [5] WHITEMAN D N, MELFISH, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurements of water and aerosols in the earth's atmosphere [J]. Appl Opt, 1992, 31 (16): 3068-3082.
- [6] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S, *et al*. The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. Laser Technology,