

·测试、试验与仿真·

天幕靶灵敏度的标定方法与试验

杜文斌, 范军旗

(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要:天幕靶探测灵敏度是天幕靶重要的性能指标。分析了天幕靶的工作原理和灵敏度机理,给出了光学镜头参数、被测弹丸长度与灵敏度之间的关系公式,提出了一种用小口径弹丸标定灵敏度的方法,推导了倍弹径数标定修正公式。通过气枪弹试验验证,文中研究的标定方法可行,给出的倍弹径数对实际使用具有明确的指导意义。

关键词:天幕靶;灵敏度;倍弹径数

中图分类号: TJ012.3⁺6; TM930

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0078-05

Study and Experiment on Sensitivity Calibration of Sky Screen Target

DU Wen-bin, FAN Jun-qi

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The detection sensitivity is an important performance index for sky screen target. Working principle and sensitivity mechanism of the sky screen target are analyzed. The relation formula of optical lens parameters, measured bullet length and sensitivity are given, a method to use the small caliber bullet to determine the sensitivity is presented, and the modified formula of caliber bullet is derived. The air gun bullet experimental tests verify that the calibration method is feasible, and the given caliber bullet has a guidance significance in application.

Key words: sky screen target; sensitivity; caliber bullet

天幕靶是一种弹丸飞行速度测量装置,天幕靶中采用了狭缝光阑和光学镜头在原光学镜头的视场形成一个薄的扇形光幕,当飞行弹丸穿过该光幕,引起光学系统后面的光电探测器上光通量的变化,后续的放大电路放大微弱变化的信号,最终输出一个代表弹丸过幕时刻的脉冲信号^[1]。当飞行物穿过引起的光通量变化太弱,引起光电探测器的反应不足后续输出脉冲信号,则称天幕靶的灵敏度达到极限,或者超出了其灵敏度作用范围。一般情况下,客户希望可以方便地计算出极限探测距离。因此,制造厂家给出灵敏度指标倍弹径数,也就是说,当确定了射击弹丸的弹径,该弹径乘以倍弹径数就是天幕靶能探测该弹丸的最大距离。由于天幕靶

的光幕存在厚度,探测愈远,厚度愈大,当光幕厚度大于弹丸的长度时,上述方法计算的极限探测距离跟实际相差较大。文中针对天幕靶灵敏度指标存在的上述缺陷,提出一种可满足使用的便捷实验标定方法,使用小口径弹标定天幕靶的灵敏度,给出一种对确定弹径和长度的弹丸,给出极限探测距离的修正公式。

1 天幕靶灵敏度分析

根据天幕靶的工作原理^[1]可知,天幕靶灵敏度是指能探测的最小光通量相对变化量。假设某天幕靶能探测的最小光通量的相对变化量为 $\delta^{[2-5]}$,则用下式表示

收稿日期:2010-12-14

基金资助:国家自然科学基金(60972005)

作者简介:杜文斌(1983-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为光电测试技术。

$$\delta = \frac{\Delta\Phi_{\min}}{\Phi} \quad (1)$$

式中, Φ 为到达光电探测器件敏感面的总光通量; $\Delta\Phi_{\min}$ 为能探测的光通量最小变化量。

为了研究方便, 假设天幕靶光学镜头各处光能量衰减一致, 天空亮度恒定, 测试的弹丸长度足够长, 从光幕的任何位置穿过, 其长度均大于光幕的厚度。则最小光通量的变化量可以用弹丸穿过处的遮光面积来表示。图1是弹丸穿过光幕的示意图。

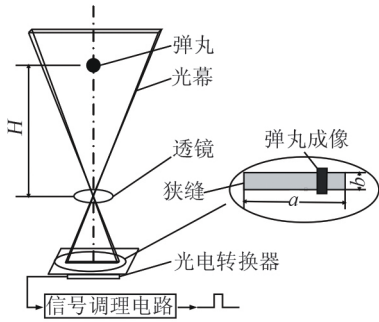


图1 天幕靶工作原理示意图

光电管接收的光通量等于狭缝的面积乘以进入狭缝的光的照度, 对于光学镜头物镜像面上的照度, 由光度学公式有^[6]

$$E'_0 = \frac{\pi}{4} \tau L_v \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (2)$$

式中, f 是光学镜头的焦距; D 是通光孔径; L_v 是光亮度; τ 是透射比。则有

$$\Phi = abE'_0 \quad (3)$$

式中, Φ 是通过狭缝的总光通量; a 是狭缝光缆的长度; b 是宽度。

假设直径为 d , 长度为 l 的弹丸, 从距离镜头 H 处的光轴穿过天幕靶的光幕面, 该位置的光幕厚度为 B , 假设 H_{\max} 为天幕靶探测该弹丸的极限距离, 弹丸穿过光幕成像如图2所示, 其中弹丸长度 $l \geq B$, 此

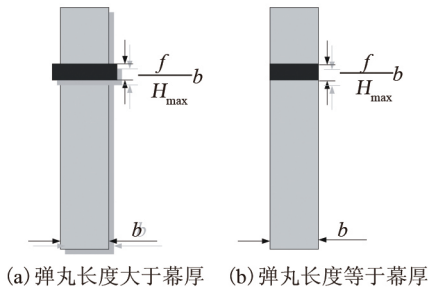


图2 弹丸穿过光幕成像

时, 弹丸遮挡的光通量 $\Delta\Phi_{\min}$ 是该天幕能探测的最小光通量, 按下式计算为

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{df}{H_{\max}} bE'_0 \quad (4)$$

由式(1)、式(3)、式(4)解得

$$H_{\max} = \frac{f}{a\delta} d \quad (5)$$

式中, f 、 a 、 δ 都是常数。从式(5)可以看出, 当天空亮度一定时, 在 $l \geq B$ 的条件下, 天幕靶的极限探测距离 H_{\max} 由弹丸的直径 d 决定。令 $\varphi = f/a\delta$, 则有

$$\varphi = \frac{H_{\max}}{d} \quad (6)$$

式中, φ 为倍弹径数, 是探测极限距离与弹丸弹径的比值, 用来描述天幕靶灵敏度大小。当 $l \geq B$ 时, φ 与被测弹丸的参数无关, 天幕靶的灵敏度可以用 φ 唯一表达。已知天幕靶的倍弹径数, 乘以弹径就是天幕靶探测该弹丸的极限距离。

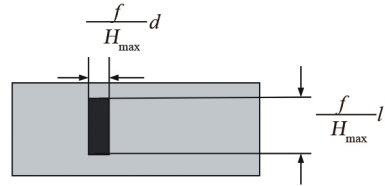


图3 弹丸长度小于幕厚的弹丸穿过光幕成像

当在 H_{\max} 处, $l < B$ 时, 弹丸通过光学镜头的成像如图3所示, 弹丸遮挡的光通量计算如下

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{f}{H_{\max}} d - \frac{f}{H_{\max}} l E'_0 \quad (7)$$

由式(1)、式(3)、式(7)解得

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{f^2 dl}{\delta ab}} \quad (8)$$

此时倍弹径数有

$$\varphi = \sqrt{\frac{f^2 l}{ab\delta d}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, φ 与被测弹丸的参数有关, 用倍弹径数不能唯一描述天幕靶的灵敏度。

2 灵敏度标定方法与描述式

实际中, 对于弹径较大的弹丸天幕靶极限探测距离高达十几米甚至几十米, 用实际弹丸验证灵敏度的试验, 操作难度较大, 还存在安全隐患。因此, 文中提出一种用小口径弹丸标定天幕靶灵敏度。

假定对给定的天幕靶,在天空亮度一定的情况下,天幕靶的灵敏度是一个定值。用气枪弹垂直射击天幕靶光幕,使弹丸垂直飞过天幕靶的光幕,用示波器观察天幕靶的弹形信号,逐步抬高弹道高度,当在高度 H 处多次射击均可以检测到有效信号,而高于 H 存在50%的漏测或者一半结果则数据无效,定义此时的弹道高度就是气枪弹能够探测的极限高度 H_{\max} 。

定义 φ_0 为天幕靶的标称倍弹径数^[7],则有

$$\varphi_0 = \frac{H_0}{d_0} \quad (10)$$

式中, H_0 为天幕靶标称探测极限距离; d_0 为弹径。 H_0 处弹长 l_0 正好等于 H_0 处光幕厚度, $k_0 = l_0/d_0$,即用弹长为 l_0 、弹径为 d_0 的弹丸标定灵敏度,极限探测距离为 H_0 ,则天幕靶的灵敏度可以用唯一一组参数 (φ_0, k_0) 表示。

推论:对于弹长与弹径比值相等的弹丸,其极限探测距离之比等于弹径比。

用确定弹长与弹径的弹丸,按上述标定方法测出的极限距离 H_{\max} ,根据天幕靶灵敏度不变的原理,可以直接换算到灵敏度表示式 (φ_0, k_0) 。

假设对于给定弹径为 d_q 、弹长为 l_q 的气枪弹,对给定的天幕靶进行灵敏度标定试验,得到极限探测距离 $H_{q\max}$,按下述2种情况换算到灵敏度表示式。

(1) l_q 小于 $H_{q\max}$ 处的光幕厚度

假设用弹径为 d_0 、弹长为 l_0 的弹丸,天幕靶极限探测距离也是 $H_{q\max}$, $l_0 = B$,有 $l_0 = bH_{q\max}/f$,由式(4)、式(8)解得

$$d_0 = \frac{fd_q l_q}{H_{q\max} b} \quad (11)$$

则有

$$\varphi_0 = \frac{H_{q\max}^2 b}{fd_q l_q} \quad (12)$$

$$k_0 = \frac{l_0}{d_0} = \frac{H_{q\max}^2 b^2}{f^2 d_q l_q} \quad (13)$$

(2) l_q 大于等于 $H_{q\max}$ 处的光幕厚度

假设用弹径为 d_0 、弹长为 l_0 的弹丸,天幕靶极限探测距离也是 $H_{q\max}$, $l_0 = B$,有 $l_0 = bH_{q\max}/f$, $d_0 = d_q$ 则有

$$\varphi_0 = \frac{H_{q\max}}{d_q} \quad (14)$$

$$k_0 = \frac{l_0}{d_0} = \frac{H_{q\max} b}{fd_q} \quad (15)$$

实际使用天幕靶,测试一确定弹长 l_c 与弹径 d_c 的弹丸,令 $k_c = l_c/d_c$,根据天幕靶的灵敏度参数 (φ_0, k_0) ,按下述2种情况测算天幕靶的极限探测距离为

$$H_{c\max} = \begin{cases} \varphi_0 d_c & k_c \geq k_0 \\ \varphi_0 \frac{l_c}{d_c k_0} d_c & k_c < k_0 \end{cases} \quad (16)$$

3 灵敏度的空域位置修正

假定天空亮度均匀,同一弹丸穿过光幕不同位置,在成像面上轴外像点的像方孔径角小于轴上像点的像方孔径角,轴外像点上的照度小于轴上像点的照度,在光电管产生的光通量变化不同,因此,要对上述标定的灵敏度标称值进行位置修正,以便为使用提供依据。假设 E' 为光轴外像点照度, E'_0 为光轴上像点照度, ω 为轴外像偏离角,图4为光路图,有光度学公式^[8,9]为

$$\frac{E'}{E'_0} = \cos^4 \omega \quad (17)$$

式中, E' 为光轴外像点照度; E'_0 为光轴上像点照度; ω 为轴外像偏离角,如图4。

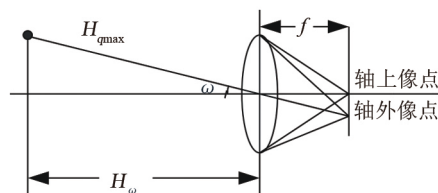


图4 光路图

假设有一弹丸弹径为 $d_{\omega 0}$ 、弹长为 $l_{\omega 0}$ 的弹丸,穿过光幕的位置点到镜头的直线距离为 $H_{q\max}$,弹长 $l_{\omega 0} = B_{\omega}$,偏离轴 ω ,到镜头垂直距离 H_{ω} ,依照弹丸轴上过靶灵敏度计算方法,空域位置灵敏度计算如下

$$\Delta\Phi_{\min} = \frac{f}{H_{q\max}} d_q \frac{f}{H_{q\max}} l_q E'_0 = \frac{d_{\omega 0} f}{H_{q\max}} b E'_0 \cos^4 \omega \quad (18)$$

$$k_{\omega 0} = k_0 \cos^4 \omega \quad (19)$$

$$\varphi_{\omega 0} = \varphi_0 \cos^4 \omega \quad (20)$$

结论:对于弹径为 d_c 、弹长为 l_c 的待测弹丸,弹长弹径比为 k_c ,从偏离轴 ω 过靶,其极限探测距离 $H_{c\max}$ 的计算如下

$$H_{c\omega\max} = \begin{cases} d_c \varphi_0 \cos^5 \omega & k_c \geq \cos^4 \omega k_0 \\ d_c \varphi_0 \frac{\sqrt{l/d}}{\sqrt{k_0}} \cos^3 \omega & k_c < \cos^4 \omega k_0 \end{cases} \quad (21)$$

4 试验与结论

4.1 试验条件

试验天气阴天,在30 min内完成试验,认为天空照度不变,照度计30°套筒限定视场,试验平均照度为736 Lux;使用XGK-80水平天幕靶为测试对象,镜头焦距为50 mm,缝宽0.5 mm,缝长40 mm;使用气枪进行测试,气枪弹弹径4.5 mm,长5 mm,速度140±20 m/s;手持射击,枪口距离靶板2 000 mm,天幕靶距离靶板500 mm。

4.2 垂直灵敏度标定试验

从2 000 mm处向上每间隔100 mm射击3次,此时信号噪声电压最大为2.3 V,为保证测试可靠性,示波器触发电平设置3 V(与天空照度有关)。在2 900 mm处射击,无触发2次,返回2 800 mm处,射击10次均有效,信号平均幅值为3.24 V,取2 800为此次试验条件下的极限探测高度。

$$B = \frac{H_{\max}}{f} b = \frac{2\ 800}{50} \times 0.5 = 28$$

气枪弹弹长小于此时的幕厚 B ,由式(12)、式(13)计算得 $\varphi \approx 3\ 480$; $k \approx 35$ 。

由式(12)可以看出与探测灵敏度相关的参数有 H_{\max} 、 b 、 f 、 d_q 、 l_q ,镜头采用定焦镜头精度高,认为镜头无误差,误差公式有

$$\Delta\varphi = \partial\varphi_{H_{\max}} + \partial\varphi_b + \partial\varphi_{d_q} + \partial\varphi_{l_q} \quad (22)$$

取高度测量误差为100 mm,缝宽误差为0.005 mm,弹径和弹长测量误差为0.02,计算得 $\Delta\varphi \approx 345$ 。

为保证仪器测试的可靠性,保证每发弹丸都可以测试出结果,因此 $\varphi_0 = 3\ 100$, $k_0 = 35$ 。

4.3 空域位置灵敏度标定试验

假设直径为 d 的弹丸,从高度为 H 的弹道上飞过天幕靶的视场,遮挡的光通量 $\Delta\Phi_{\min}$ 所引起光电转换器件光电流的变化量 ΔI ,经过调理、放大电路后,输出模拟信号的幅值为 V ,即

$$V = \beta R \alpha \Delta\Phi \quad (23)$$

式中, β 为电路放大倍数; R 为电流电压转换电阻; α

为光电探测器件的光照灵敏度^[10]。可以看出,输出电压的高低与光通量的变化成正比。

对于给定的天幕靶,以轴上的信号幅值为满幅值,则轴外点电压相对变化为

$$\frac{V_{\omega}}{V} = \frac{\beta R \alpha \frac{f}{H} d \frac{f}{H} l E'_0 \cos^4 \omega}{\beta R \alpha \frac{f}{H} d \frac{f}{H} l E'_0} = \cos^4 \omega \quad (24)$$

结合式(20),可得弹丸过靶信号幅值的相对变化和偏轴倍弹径数的相对变化相等,由此可见,在同一射击高度上,测试出不同空域位置 ω 处信号幅值的相对变化,即可得到天幕靶灵敏度的相对变化。

在2 400 mm处进行横向射击,每一位置射击5次,取5次平均值作为该位置测试数据。图5为实验测得镜头在2.3 m距离上信号幅值变化和计算信号幅值相对变化。

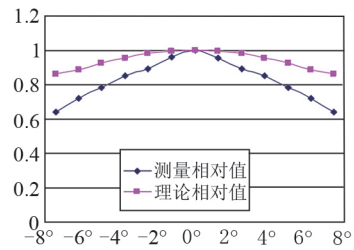


图5 相对灵敏度计算值与测试值对比图

从图5可以看出,计算相对变化曲线与测试相对变化曲线变化趋势相同,但测试值变化显著,与测试值存在较大的差异,由于系统采用的是照相机镜头,在设计的时候为了保证中心区域的成像质量,镜头设计是带有渐晕,因此计算值应该按照下式计算

$$\frac{V_{\omega}}{V} = p \cos^4 \omega \quad (25)$$

式中, p 为渐晕系数,且 p 小于1。所以计算值的变化应该更显著;因为测试值是通过测试信号电压幅值计算的,在测试的时候天空照度是变化的,也会对信号幅值的测量带来影响。对计算值与测试值进行相关检验,相关系数为0.892,具有很好的相似性。

文中主要是对于天幕靶灵敏度标定方法的研究,前人对天幕靶灵敏度的标定主要是基于经验方法。文中的试验使用的是气枪,气枪射击速度变化较大,气枪弹形状不是圆柱,射击方式不够精确,故而存在精度不够高的问题。文中给出的天幕靶灵

敏度一组参数倍弹径数和弹长弹径比,可唯一地描述天幕靶灵敏度指标。实验验证了天幕靶视场空域不同位置灵敏度的变化规律。文中所做的研究是假定天空背景亮度均匀的基础上进行的,对于天空亮度不均匀及天空亮度随时间变化较大时需要做进一步的研究。

参考文献

- [1] 倪晋平,王铁岭. 光电靶的工作原理及应用[J]. 西安工业学院学报,1997,17(1):42-46.
- [2] 王东. 双光幕精密测速系统设计[D]. 天津:天津大学,2008.
- [3] 苏建刚. 天幕靶测速精度分析[J]. 弹道学报,1994(2):

47-53.

- [4] 江铭,李翰山,孙沮,等. 天幕靶光学系统性能分析[J]. 西安工业大学学报,2006,26(2):127-130.
- [5] 李翰山. 光电探测靶探测灵敏度的改善研究[D]. 西安:西安工业学院,2004:25-36.
- [6] 江铭,李翰山,高洪尧,等. 天幕靶光学系统性能分析[J]. 西安工业学院学报,2006,26(2):127-130.
- [7] 中国兵器工业总公司标准, WJ 2504-98:6-8[S].
- [8] 李景镇,苏世学,赵俊民,等. 光学手册[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1986:14-15.
- [9] 韩军,刘钧. 工程光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:80.
- [10] 高旭. 天幕靶灵敏度控制技术研究[D]. 西安:西安工业学院,2010:25-32.

(上接第43页)

束整形的基本理论与技术,给出了高斯光束通过微圆孔衍射整形变换的3种基本情形,并进行了仿真实验。如果选择适当微孔并配合使用相位调制元件,可以得到所需要的激光束,该方法跟其他方法比较更为简而易行。这对激光束的传输变换和调控有着重要意义,可应用于激光工程、微光学以及微光机电中微孔板、微透镜和光耦合器等。

参考文献

- [1] 吕百达. 激光光学:光束描述、传输变换与光腔技术物理

[M]. 3版.北京:高等教育出版社,2003:1-196.

- [2] 杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州:浙江大学出版社,2008:1-374.
- [3] H P 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:257-295.
- [4] 马科斯·玻恩,埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 7版. 杨葭荪. 北京:电子工业出版社,2005:342-429.
- [5] 常山,吴波,桑志文,等. 3种圆孔衍射的两种计算方法研究[J]. 应用光学,2010,31(5):734-740.
- [6] 国分泰雄. 光波工程[M]. 北京:科学出版社,2008:68-220.

(上接第77页)

4 结论

文中从评价结果是否和人眼判读结果相一致为出发点,利用中国颜色体系,建立了亮度数据库,检验了CIE1976 $L^*a^*b^*$ 、LMS、 $l\alpha\beta$ 颜色空间的亮度分量在评价伪装效果中的应用问题。实验结果表明, L^* 分量具有均匀性好的特点, L_m 分量和 l 分量分别在灰度较低和灰度较高时,其伪装效果评价结果与人眼判读结果相一致。对于不同的实际伪装背景如阴影、雪地、沙漠等,要考虑目标与背景的亮度,选取合适的亮度分量,才能给出客观的评价结果。

参考文献

- [1] 中国颜色体系[S], GB/T 15608-2006.
- [2] 均匀色空间和色差公式[S]. GB/T 7921-1997.

- [3] 王浩,曾朝阳,兰永杰. LMS颜色空间稳定性在伪装评价中的应用[J]. 光电技术应用,2007,22(5):10-12.
- [4] Daniel L Ruderman. Statistics of cone responses to natural images :implications for visual coding [J]. Opt Soc Am A , 1998 ,15(8) :2036-2045.
- [5] Erik Reinhard , Michael Ashikhmin , Bruce Gooch , et al. Colortransfer between image[C] //IEEE transactions on computer graphics and applications. USA : IEEE ,2001.
- [6] 朱志刚. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,1998:5-10.
- [7] 廉玉生,王秀泽. 5种不同颜色空间的均匀性研究[J]. 测绘科学技术学报,2007,24(2):104-107.
- [8] 贾其,吕绪良,吴超,等. 基于人眼视觉特性的红外图像增强技术研究[J]. 红外技术,2010,32(12):108-112.
- [9] 汪东,吕绪良,许卫东,等. 基于灰度直方图分析技术的伪装应用模型[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)2004,5(3):74-77.