

# 光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力的检验

霍金明<sup>1,2,3</sup> 沈湘衡<sup>1</sup> 叶露<sup>1</sup> 顾营迎<sup>1,2</sup> 张宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 长春大学光华学院, 吉林 长春 130033)

**摘要** 低对比度动态目标捕获能力是衡量光电跟踪设备总体性能的重要内容之一。针对光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力室内检验方法欠缺、低对比度动态目标捕获原理尚不完善等问题,提出了实验室内光电跟踪设备对低对比度动态目标捕获能力的检验。检验采用可调对比度无穷远目标源装置和可调速转台,为被检仪器提供可准确度量对比度的光学基准目标和可准确测量速度的动态环境,根据被检设备对该动态目标的提取情况,验证光电跟踪设备的捕获能力。通过分析目标移动速度、目标大小对目标对比度的影响,评价光电跟踪设备在不同目标对比度和不同速度下的捕获性能。检验结果表明,在背景辐亮度为  $38 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$  的情况下,当直径为  $4 \text{ mm}$  目标以  $7.45^\circ/\text{s}$  以上速度从无穷远处进入某光电跟踪设备的视场时,该光电跟踪设备不能进行有效地捕获。检验结果通过光电跟踪设备对给定对比度动态目标的捕获情况来评价其整机捕获能力。

**关键词** 探测器; 检验; 捕获能力; 动态目标; 动态对比度; 辐亮度

中图分类号 V556.6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0512004

## Testing of Low Contrast Dynamic Target Acquisition Ability for Photoelectric Tracker

Huo Jinming<sup>1,2,3</sup> Shen Xiangheng<sup>1</sup> Ye Lu<sup>1</sup> Gu Yingying<sup>1,2</sup> Zhang Ning<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Guanghua College of Changchun University, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Currently, there are some problems on indoor test methods relating to low contrast dynamic target acquisition in photoelectric tracker, and related theory about low contrast dynamic target acquisition. Because low contrast dynamic target acquisition is one of the important factors relating to overall performance of photoelectric tracker, a new indoor method for performance assessment of low contrast dynamic target acquisition in photoelectric tracker is proposed. Infinite target source of adjustable contrast and turntable of adjustable speed are considered as detection device. Optical reference target, of which the contrast can be accurately measured, is provided for detecting opto-electronic tracker working in dynamic environments where the rotation rate can be precisely set, in order to validate acquisition ability of opto-electronic tracker for low contrast dynamic object based on target extraction. The opto-electronic tracker can also be evaluated in terms of acquisition performance or acquisition speed in different target contrasts and different movement speeds by the analyses of the target's movement speed, target size that affects target contrast. The experimental results show that the photo-electronic tracker cannot effectively capture the object of which the diameter is  $4 \text{ mm}$  entering the field of view at the rate of greater than  $7.45^\circ/\text{s}$  from infinity in the background of which the spectral radiance is  $38 \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$ . Furthermore, the results can be applied to evaluate the acquisition ability of photo-electric tracker by a given contrast dynamic target.

**Key words** detectors; testing; acquisition ability; dynamic target; dynamic contrast; spectral radiance

**OCIS codes** 120.4800; 120.4820; 230.2090

收稿日期: 2012-12-28; 收到修改稿日期: 2013-02-26

基金项目: 中国科学院创新基金(YZ200904)资助课题。

作者简介: 霍金明(1973—),男,博士研究生,讲师,主要从事图像处理及自动控制方面的研究。

E-mail: jiminyhall@126.com

导师简介: 沈湘衡(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测量设备精密检测技术和方法方面的研究。

E-mail: shenxiangheng@yahoo.com.cn

# 1 引 言

近年来,对光电跟踪设备低对比度静态目标捕获能力的检验已进行了相关分析和研究,并取得了一定的数据和成果<sup>[1]</sup>,但实际中,光电跟踪设备进行捕获与跟踪的目标一般来说是动态的<sup>[2]</sup>,对光电跟踪设备性能的评价也应建立在动态环境基础之上,虽然通过可调对比度无穷远目标源装置可以在室内检验出光电跟踪设备静态目标最低可捕获目标对比度,但当目标移动时,最低可捕获目标对比度会发生变化,而对光电跟踪设备捕获真实动态目标性能的相关室内检验研究,在国内外文献中尚未见报道。而室外检验又需要众多的人力物力,不适合批量产品的检验,且目标移动时,动态对比度变化规律和相关理论也需要实验验证<sup>[3~10]</sup>。鉴于此,需建立一种室内评价光电跟踪设备低对比度动态目标捕获性能系统,建立室内评价系统的重点是连续可调对比度目标的获得和对目标对比度的准确度量及可控动态环境的建立。为了能够在室内评价光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力,建立了可以产生连续可调、可准确度量对比度目标和背景的可调对比度无穷远目标源装置,通过精密匀速转台,建立了可控动态环境。在此基础之上,分析目标与背景辐亮度、目标移动速度、目标尺寸和 CCD 积分时间等因素对捕获能力的影响,进一步完善动态对比度相关理论并进行实验验证,根据动态对比度相关理论确定光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力检验内容及方法,并给出检验结果。

本文针对光电跟踪设备低对比度动态目标的捕获能力检验进行探索性的初步研究。利用可调对比度无穷远目标源装置,设计辐亮度连续单独可调的目标与背景,在对动态对比度理论分析与实验验证基础之上,确立评价指标。将待检光电跟踪设备置于匀速转台上,通过调整目标和背景的辐亮度,调整转台速度及目标的大小,获得光电跟踪设备捕获性能的检验指标。

# 2 检验系统对比度标定方法

检验系统的主要部分为可调对比度无穷远目标源装置<sup>[11,12]</sup>,为了能够验证待检设备的动态性能,增加了可准确度量转动速度和转动角度的匀速转台,检验系统实物如图 1 和 2 所示。

检验系统原理框图如图 3 所示,相应 CCD 成像图如图 4 所示。可调对比度无穷远目标源装置利用背景积分球和目标积分球,通过光阑控制光通量来

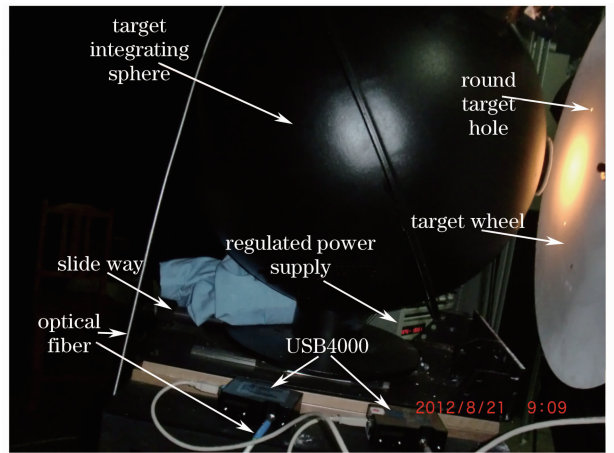


图 1 目标积分球实物

Fig. 1 Physical target integrating sphere

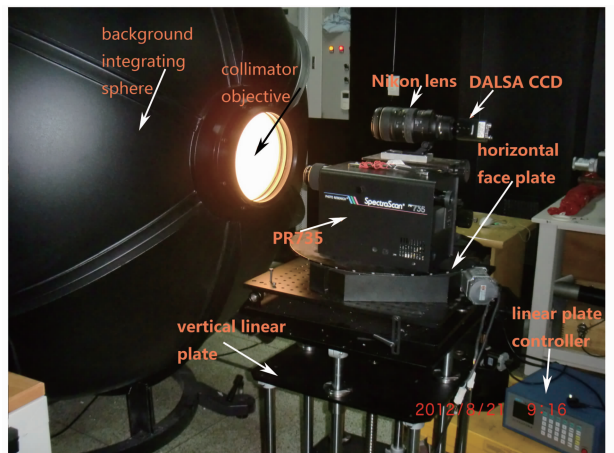


图 2 背景积分球实物

Fig. 2 Physical background integrating sphere

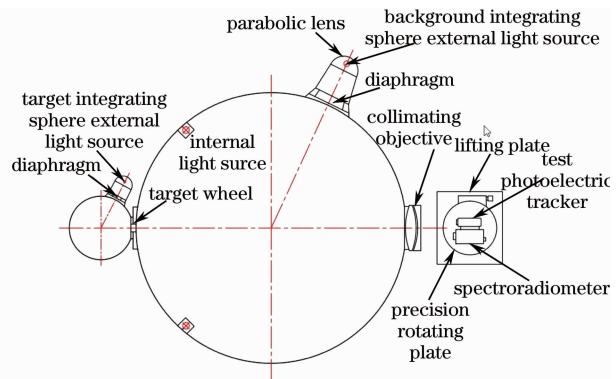


图 3 检验系统原理框图

Fig. 3 Testing system principle block diagram

产生对比度连续可调的均匀目标与均匀背景。图 4 中,镜头焦距为 150 mm,背景积分球所形成的视场边界是无法避免的,但对于一般的光电跟踪设备来说,边界内的视场能够说明其目标捕获状况。CCD 成像图中目标积分球所成目标图像的灰度直方图如图 5 所示,该目标大小为 20 pixel×20 pixel,以目标

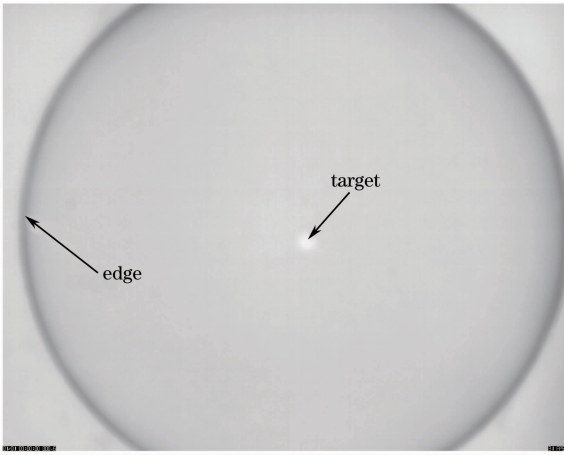


图 4 CCD 成像图

Fig. 4 CCD image

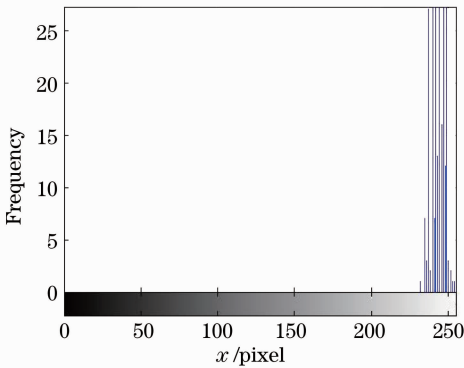


图 5 目标图像直方图

Fig. 5 Target histogram

为中心,边长为 200 pixel 的包含目标在内的正方形图像直方图如图 6 所示。

采用光谱辐亮度计测量目标辐亮度  $L_o$  和背景辐亮度  $L_b$  并按(1)式来计算对比度:

$$C_1 = \left| \frac{L_o - L_b}{L_b} \right|, \quad (1)$$

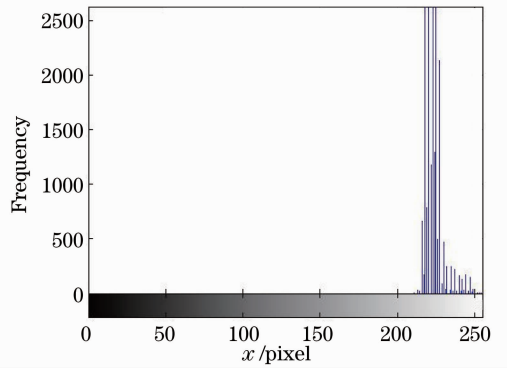


图 6 包含目标在内的正方形图像直方图

Fig. 6 Square histogram that contains the target

根据(1)式计算出的对比度,最低对比度可捕获目标优于 30% 的目标均为低对比度目标。

### 3 动态对比度理论分析与实验验证

设目标辐亮度为  $L_o$ , CCD 的光谱效率函数为  $C(\lambda)$ , 光学系统的透射率为  $\tau_o$ , 积分时间为  $t_{int}$ , 相对孔径的倒数为  $F$ , 光学系统点扩散引起的衰减为  $(d/d_r)^2$ ,  $d, d_r$  分别为几何和实际像点尺寸, 则 CCD 接收到的辐照量为<sup>[13,14]</sup>

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \frac{\pi}{4} L_o \tau_o / F^2 (d/d_r)^2 t_{int} d\lambda. \quad (2)$$

由于目标经光学系统的成像点近似为圆形, 而 CCD 像元为矩形, 设  $a, b$  分别为 CCD 像元的长度和宽度,  $n$  为像点覆盖像元的个数, 则有

$$\pi (d_r/2)^2 = n^2 ab. \quad (3)$$

设目标相对视轴的转动速度为  $\omega$ , 距离为  $S$ , 转动半径为  $R$ , 转动方向为水平, 背景辐亮度为  $L_b$ , 根据(2)、(3)式, 并设 CCD 转换效率为  $\eta$ , 相机焦距为  $f'$ , 得到 CCD 目标灰度值为

$$H_{i_o} = \begin{cases} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \eta \frac{1}{16} \frac{\pi^2 d^2}{n^2 ab} \tau_o / F^2 \left[ L_o \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} + L_b \left( t_{int} - \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \right) \right] d\lambda, & t_{int} > \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \eta \frac{1}{16} \frac{\pi^2 d^2}{n^2 ab} \tau_o / F^2 L_o t_{int} d\lambda, & t_{int} \leq \frac{ib \times S}{\omega R \times f'} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $0 \leq i \leq n$ 。其中  $i = n$  为目标覆盖像点中心处灰度值, 其他值为头尾处的灰度值。由(4)式可以看出当目标移动时, 目标沿运动方向上覆盖像点的长度(文中设像点水平运动, 长度为  $nb$ ) 越长(像元尺寸

一定时, 即  $n$  越大), 目标中心处灰度越接近静态时灰度。而移动速度越大, CCD 积分时间越长, 目标灰度就越接近背景灰度, 当速度达到一定程度时, 目标最终要淹没于背景之中。但若减少积分时间, 则

目标与背景均会变暗,图像对比度就会降低,对目标的捕获也会变得更加困难,如若能够调节光圈,情况会有所改善。从以上分析可知,对于小、快等目标很

难实现跟踪。图 7 各图为目标在不同速度时,CCD 所成图像,由该图可以看出目标随着与 CCD 相机相对运动速度的增加而逐渐淹没于背景之中。

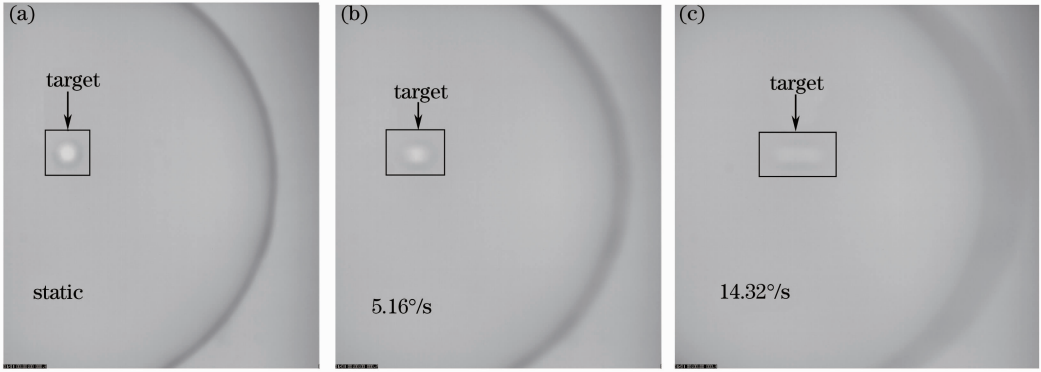


图 7 目标移动速度对 CCD 成像的影响

Fig. 7 Effect of target speed on CCD imaging

图 8 和图 9 中,积分时间为 40ms 曲线目标与背景辐亮度分别为  $0.46345 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$  和  $0.3956 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ ,积分时间为 30 ms 曲线目标与背景的辐亮度分别为  $0.66845 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$  和  $0.51265 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 。图 8 中图像灰度对比度随目标与 CCD 相机相对运动速度的升高而降低,通过比较可以看出,积分时间越长,灰度对比度越早下降,符合(4)式中积分时间越长,目标灰度下降越早的结论。图 9 所示误差曲线中,仅考虑目标覆盖像点中心处灰度理论值与实际值的相对误差,相对误差公式为

$$E = \left| \frac{H_{\text{theory}} - H_{\text{fact}}}{H_{\text{fact}}} \right|, \quad (5)$$

式中  $H_{\text{theory}}$  和  $H_{\text{fact}}$  分别代表通过(4)式计算而来的理论灰度值和由图像实测而得的灰度值,由误差曲线可以看出,(4)式计算出的灰度理论值与实际值间的相对误差不到 2%。

#### 4 光电跟踪设备动态性能检验实验

由上述分析可知,目标移动速度对光电跟踪设备的捕获是具有一定影响的,速度越快,越难以捕获,因此若要对光电跟踪设备捕获能力进行评价,有必要评价其动态性能。根据(4)式及图像灰度对比度公式,得到目标动态对比度公式为

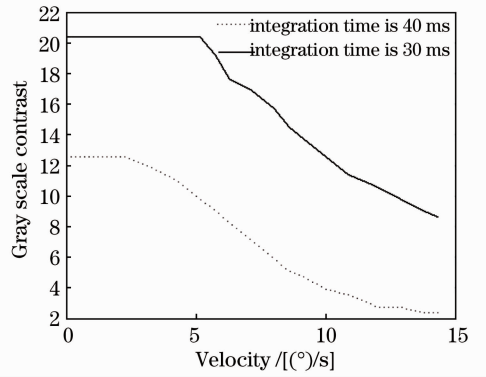


图 8 图像对比度与运动速度关系曲线

Fig. 8 Relationship between contrast and speed

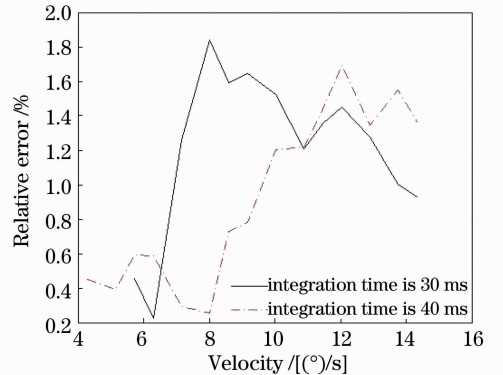


图 9 动态图像灰度理论值与实测值相对误差曲线

Fig. 9 Relative error curves between theoretical and measured values of dynamic target contrast

$$C_{TM} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \eta \frac{1}{16} \frac{\pi^2 d^2}{n^2 ab} \tau_o / F^2 \left[ (L_o - L_b) \min \left( \frac{ibS}{\omega R f'}, t_{int} \right) \right] d\lambda}{v_w - v_{bl}}, \quad (6)$$



式中  $\min\left(\frac{ibS}{\omega Rf}, t_{int}\right)$  代表取  $\frac{ibS}{\omega Rf}$  和  $t_{int}$  二者的最小值,  $v_w - v_M$  为 CCD 的灰度等级, 对于 8 位灰度图像, 该值为 255。由(6)式计算所得对比度与实测对比度间绝对误差小于 2%。由(6)式分析可知, 除去光电跟踪设备本身的因素, 影响光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力的还有目标和背景的辐亮度差、目标移动方向上的尺寸及目标与待测光电跟踪设备之间的距离和相对运动速度。为了客观评价光

电跟踪设备的捕获能力, 可以根据这几项确立光电跟踪设备低对比度动态目标捕获性能检验的具体内容: 1) 临界捕获静态黑目标; 2) 临界捕获 30% 对比度以下动态黑目标; 3) 临界捕获 30% 以上对比度动态黑目标; 4) 临界捕获静态白目标; 5) 临界捕获 30% 对比度以下动态白目标; 6) 临界捕获 30% 以上对比度动态黑目标。

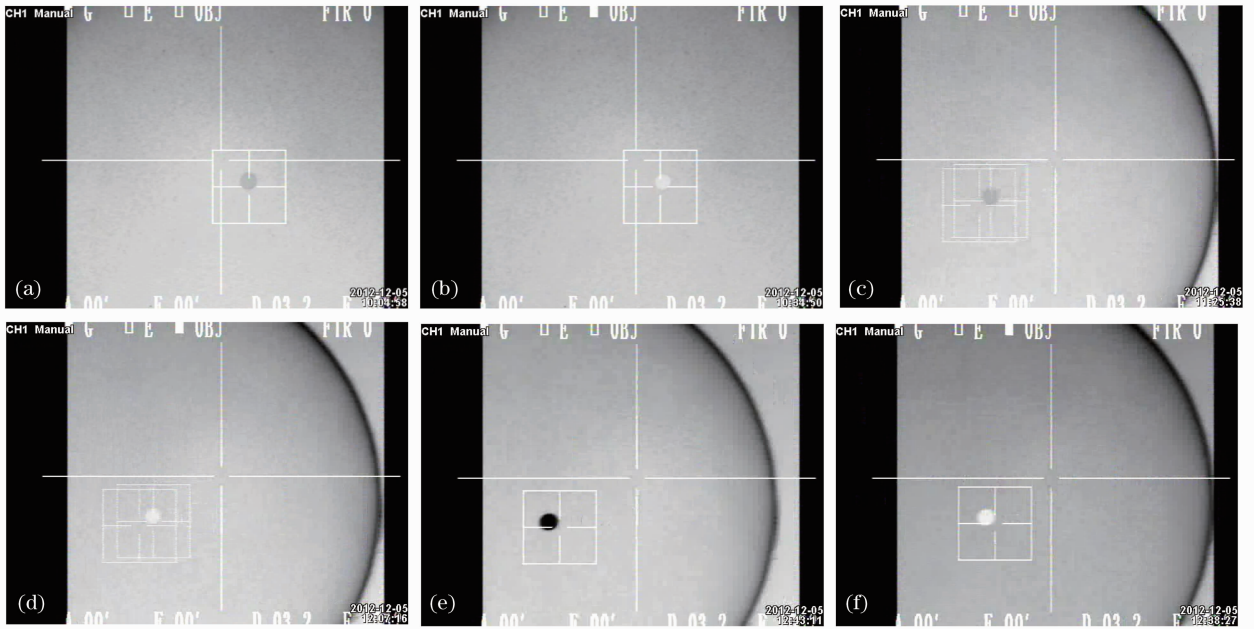


图 10 光电跟踪设备动态捕获性能检验。(a) 临界捕获静态黑目标; (b) 临界捕获静态白目标; (c) 临界捕获 30% 对比度以下动态黑目标; (d) 临界捕获 30% 对比度以下动态白目标; (e) 临界捕获 30% 以上对比度动态黑目标; (f) 临界捕获 30% 以上对比度动态白目标

Fig. 10 Testing of low contrast dynamic target acquisition ability for photoelectric tracker. (a) Critical acquire static black target; (b) critical acquire static white target; (c) critical acquire dynamic black target with contrast under 30%; (d) critical acquire dynamic white target with contrast under 30%; (e) critical acquire dynamic black target with contrast over 30%; (f) critical acquire dynamic white target with contrast over 30%

为检验光电跟踪设备低对比度动态目标的捕获能力, 需测量目标与待检光电跟踪设备之间在一定相对运动速度下的目标对比度。为方便设置目标与待测光电跟踪设备之间的相对运动速度, 本次检验均是在没有伺服系统的情况下进行。应用可调对比度无穷远目标源系统对某光电跟踪设备进行检验, 对比度计算公式采用(1)式, 光谱辐亮度计的工作波段为 380~1080 nm, 工作视场为  $0.1^\circ$ , 可调对比度无穷远目标源装置的准直物镜焦距为 2066 mm, 目标孔选取的直径应大于  $2066 \tan 0.1^\circ \approx 3.6$  mm。选目标孔直径为 4 mm 圆孔, 记录数据均采用 5 次平均法, 转台转动速度精度为  $0.05^\circ/\text{s}$ 。

检验时, 将待检光电跟踪设备静止置于转台上,

缓慢调节目标积分球光阑, 改变目标辐亮度, 使目标变亮(或变暗)直到该光电跟踪设备能够临界捕获该目标为止, 此时的目标对比度即为临界捕获目标对比度。在目标能够被捕获的情况下, 转动转台, 令目标匀速穿越光电跟踪设备的视场, 调整转台速度直到该光电跟踪设备临界捕获该目标为止, 记录此时转台速度与临界捕获目标对比度, 转台速度即为目标与待检光电跟踪设备之间的相对运动速度。继续调节目标积分球光阑, 增大目标对比度, 记录临界捕获目标对比度和相应的相对运动速度。具体记录数据为临界捕获静态目标对比度到 30% 目标对比度之间等间隔记录 5 组数据, 30% 目标对比度到 90% 目标对比度之间等间隔记录 5 组数据, 由于 30%~

90%目标对比度时,目标与待检光电跟踪设备之间的相对运动速度几乎不变,因此表中相对运动速度

为5组数据中的平均值。具体检验结果如表1所示。

表1 光电跟踪设备动态捕获能力检验结果

Table 1 Testing results on low contrast dynamic target acquisition ability of photoelectric tracker

Background radiance; 38 W/(sr·m <sup>2</sup> ) (bright backgrounds)			
Black target (target darker than background)		White target (target brighter than background)	
Relative speed /[(°)/s]	Dynamic target contrast	Relative speed /[(°)/s]	Dynamic target contrast
0~5.16	12%	0~5.73	13%
5.16~7.45	12%~30%	5.73~7.45	13%~30%
7.45	30%~90%	7.45	30%~90%
Background radiance; 6 W/(sr·m <sup>2</sup> ) (bright backgrounds)			
Black target (target darker than background)		White target (target brighter than background)	
Relative speed /[(°)/s]	Dynamic target contrast	Relative speed /[(°)/s]	Dynamic target contrast
0~4.58	11%	0~5.16	12%
4.58~6.88	11%~30%	5.16~6.88	12%~30%
6.88	30%~90%	6.88	30%~90%

## 5 检验结果说明

本次检验主要针对地面可见光光电跟踪设备对空中动态目标的捕获能力评价。考虑到一年中天空辐亮度的变化范围,最大辐亮度应达到夏至太阳高度角70°时天空辐亮度,当大地反射率为0.6时,该值为38 W/(sr·m<sup>2</sup>),因此检验装置能够模拟出从早晨到黄昏晴朗天空时的背景条件。可模拟的目标对比度范围为0%~90%,目标与设备间的相对运动速度范围为0°/s~14°/s。

表1结果反映出该光电跟踪设备在目标与设备间的相对运动速度较低时,能够在背景辐亮度较大变化范围的情况下,捕获低对比度目标。如亮背景黑目标,当目标与光电跟踪设备间的相对运动速度为5.30°/s,目标对比度高于14%时,方能捕获。当处于以下条件时,该设备不能捕获目标:1)目标与设备间的相对速度很高,此时无论目标对比度为何值,该设备均不能捕获目标。如亮背景时,相对运动速度大于7.45°/s;暗背景时,相对运动速度大于6.88°/s;2)目标对比度低于某值时,无论目标与设备间的相对运动速度为何值,该设备均不能捕获目标。如亮背景黑目标和暗背景白目标时,目标对比度小于12%;亮背景白目标时,目标对比度低于13%;暗背景黑目标时,目标对比度低于11%;3)目标与背景相对运动速度较快,而目标对比度低于所需时,该设备不能捕获目标。如亮背景黑目标,当目标与光电跟踪设备间的相对运动速度为5.30°/s,目标对比度低于14%。

目标捕获时,当目标与待检光电跟踪设备之间的相对运动速度达到一定值时,光电跟踪设备将不能捕

获当前对比度条件下的目标,若想继续捕获该目标,需增加目标对比度,但当目标与设备间相对运动速度继续升高到某值时,即使目标对比度已经很大,光电跟踪设备也不能捕获该相对运动速度下的目标。

此外,亮暗背景下检验结果是不同的,暗背景条件下,目标能够被捕获的相对运动速度普遍比亮背景低,这是符合(4)式的。因为背景越暗,积分时间也就越长,从而速度的影响也就越大,但该光电跟踪设备具有一定的光圈调节功能,所以积分时间变化幅度不大,从而亮暗背景的影响并不是很大。该光电跟踪设备具有根据背景亮暗自动调节积分时间功能,调节范围为32 μs~32 ms。该光电跟踪设备对于黑白目标的捕获能力也不相同,同等相对运动速度下,临界捕获黑目标对比度比临界捕获白目标对比度偏低。当目标对比度大于30%时,由于受光电跟踪设备芯片处理速度及处理算法的影响,临界捕获低对比度动态目标时,目标与光电跟踪设备间相对运动速度并不会随对比度的继续升高而有所改变。而检验的光电跟踪设备临界捕获30%以上目标时,相对运动速度普遍偏低,这是由该光电跟踪设备芯片处理速度较低、处理算法较为复杂等原因造成。其中该光电跟踪设备芯片频率为200 MHz,CCD相机为12位,但当前采用12位相机的光电跟踪设备频率一般为600 MHz。

## 6 结 论

理论与实验结果表明,应用可调对比度无穷远目标源的光电跟踪设备捕获性能评估系统,根据经

过实验验证的动态对比度理论为依据所设计的检验内容,能够对光电跟踪设备动态目标捕获性能进行有效地评价与分析,检验实验中实现了室内光电跟踪设备对不同运动速度、不同对比度目标的捕获能力的评价。检验结果说明,文中所述检验系统能够对具有低速、低对比度目标需求的光电跟踪设备动态低对比度目标的捕获能力进行检验。

### 参 考 文 献

- 1 Ye Lu. Testing of low-contrast target acquisition for photoelectric tracket [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1115001  
叶 露. 光电跟踪设备低对比度目标捕获能力检验方法研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 1115001
- 2 William Priedhorsky, Jeffrey J. Bloch. Optical detection of rapidly moving objects in space [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(3): 423~433
- 3 Meng Xixi, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Method to realize autofocus of remote sensing camera based on the TDI pattern of interline transfer progressive scan CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1128002  
孟希羲, 冯华君, 徐之海 等. 基于面阵 CCD 的时间延时积分模式的空间相机自动对焦[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1128002
- 4 Zhang Ning, Shen Xiangheng, Yang Liang *et al.*. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1286~1294  
张 宁, 沈湘衡, 杨 亮 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1286~1294
- 5 Nei Shouping, Wang Ming, Liu Feng. Image segmentation algorithm study for low contrast image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 89~91  
聂守平, 王 鸣, 刘 峰. 低对比度图像分割算法研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 89~91
- 6 Xiong Yan, Zhang Guilin, Peng Jiexiong. A method of automatic target recognition algorithm performance evaluation [J]. *Automatic Journal*, 1996, **22**(2): 190~195  
熊 艳, 张桂林, 彭嘉雄. 自动目标识别算法性能评价的一种方

- 法[J]. *自动化学报*, 1996, **22**(2): 190~195
- 7 Zhou Jin, Wu Qinzhang. Performance evaluation of dim target tracking algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(1): 19~22  
周 进, 吴钦章. 弱小目标跟踪算法性能评估的研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(1): 19~22
- 8 Yu Guozhe. Application of Wavelet Transform in Low Contrast Target Correlation Detection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009  
于国着. 小波变换在低对比度目标相关探测的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2009
- 9 Yan Shihua, He Yongqiang, Zhou Yulong. Maneuvering target model of the infrared fisheye detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0911002  
严世华, 何永强, 周玉龙. 基于红外鱼眼探测系统的运动目标模型[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0911002
- 10 Li Shanshan, Wang Qi, Feng Xingle. A novel quality metric based on luminance and contrast model for image fusion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 061001  
李珊珊, 王 琦, 冯兴乐. 基于亮度和对比度模型的图像合质量评估标准[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 061001
- 11 Wang Suhua, Sheng Xiangheng, Ye Lu. Calibration of contrast for adjustable contrast optical target equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(5): 949~956  
王素华, 沈湘衡, 叶 露. 可调对比度目标源装置中对比度的标定[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(5): 949~956
- 12 Ye Lu, Gu Lishan, Shen Xiangheng. Design of adjustable contrast optical target [J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(5): 681~684  
叶 露, 谷立山, 沈湘衡. 可调对比度光学无穷远目标源设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(5): 681~684
- 13 Wang Jiaqi, Ren Jianyue, You Yingqi *et al.*. Analysis on the effective ranging of TV tracking for low altitude target [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(5): 523~527  
王家骥, 任建岳, 尤英奇 等. 低飞小目标电视跟踪作用距离分析[J]. *光学学报*, 1994, **14**(5): 523~527
- 14 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 102~103  
张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 102~103

栏目编辑: 何卓铭