

红外动态场景中目标轨迹模拟系统的设计

陈亮, 屈惠明, 顾国华, 王文娟, 陈钱
(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:传统的红外搜索跟踪系统的室内检测通常使用安放有若干平行光管的检测架,检测架上的平行光管处于不同方位角和俯仰角。这种方法往往精确度较低、体积庞大,且移动不灵活,不适合短距离的室内试验。设计并实现了一种小目标轨迹模拟系统,该系统以高精度步进电机驱动小目标圆盘运动,黑体温度辐射源用来提供目标温度。PC机通过RS-232串口连接步进电机,由VB编写的软件界面设定步进电机运行的速度、方向及运行角度值,给出目标运行坐标轨迹,通过测角精度算法转化为方位与俯仰角。将被测试搜索跟踪系统给出的方位与俯仰角实测值与算法得到的理论值分析比较之后,即可得出被测试搜索跟踪系统精度。文中详细介绍了该小目标轨迹模拟系统的设计与实现,并给出了实验结果与分析。

关键词:小目标轨迹;测角精度;方位角;俯仰角

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.018

Small target track simulation system designed for dynamic infrared scene simulation

CHEN Liang, QU Hui-ming, GU Guo-hua, WANG Wen-juan, CHEN Qian
(School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The traditional indoor test of the infrared search and track system usually uses a test device with several collimators, which are fixed at different azimuth and pitching angles. The test device is not suitable for short distance indoor experiments because of its low accuracy, huge size and uneasiness to move. The proposed small target track simulation system drives the small target disk by a precise stepping motor. The blackbody radiation sources provide target temperature. PC connects the stepping motor through RS-232 serial interface, the software interface written with Visual Basic sets the stepping motor's running speed, direction and the operating angle value. PC shows the object's coordinates track and then turns them into azimuth and pitching angles through the measuring angle algorithm. Comparing the azimuth and pitching angles measured by the infrared search and track system with the theoretical value then the tested system's precision is gained. The design and implementation of the small target track simulation system are discussed in detail. Analysis for the experiment results is also presented.

Key words: small target simulation; measuring angle accuracy algorithm; azimuth; pitching angle

1 引言

红外搜索与跟踪(infrared search and track,IRST)系统,是指一类基于红外辐射的被动式的探测系统,用于及时地探测和捕获背景中的特定红外辐射目标,并向显示系统或武器控制系统发送目标的方位和威胁度等告警信息^[1-2]。

基金项目:教育部“长江学者和创新团队发展计划”(No. IRT0733);近程高速目标探测技术国防重点学科实验室;江苏省自然科学基金项目(No. BK2008049)资助。

作者简介:陈亮(1984-),男,硕士研究生,研究方向为红外成像电子学理论和成像系统测试评估技术。E-mail:allanliang3307@163.com

收稿日期:2011-03-16;**修订日期:**2011-04-22

随着近年来红外焦平面器件的发展,各种智能型红外搜索跟踪系统竞相问世,在航空、航天以及军事等领域发挥着越来越重要的作用。智能型红外搜索跟踪系统的出现,对传统的测试手段提出了挑战^[3-5]。由于系统的目标探测率、虚警率等主要战技指标很大程度上依赖于目标信号的细节及背景特性,传统简单的实验室测试无法真实地反映实际情况;而以往借助野外靶场试验的方法则存在着测试条件不易控制、费用昂贵、机动性差、试验次数受限等缺点。红外动态场景仿真技术正是在这种背景下发展起来的:它以计算机、信息处理、微电子等高新技术为依托,革新了传统的实验室测试方法,也弥补了靶场试验的不足。将大量红外仿真测试和有限的靶场试验相结合,对于客观评价系统性能、缩短研制周期、节约经费开支等都具有重要的意义,它已普遍地应用于系统设计前的方案论证和系统设计中的方案修正阶段^[6]。

论文中提到的搜索跟踪系统由一款双视场长波红外热像仪构建组成,小目标轨迹模拟系统正是在对于搜索跟踪系统的目标检测、探测距离、目标跟踪等性能参数测试的基础上,利用软件编程控制小目标的运动,结合黑体辐射源模拟的目标温度,生成高逼真动态小目标红外场景的灰度图像,为红外搜索跟踪系统提供室内测试环境,主要适用于搜索跟踪系统性能检测或当系统性能下降时的故障定位检测。

2 小目标轨迹模拟系统

整个小目标轨迹模拟系统由黑体辐射源、双目标轨迹模拟器、测试计算机以及测试软件组成。双目标轨迹模拟器由运动的靶标和支撑靶标的移动支架组成,运动靶标由一台步进电机驱动转盘上两个小孔模拟点目标,用来测试搜索跟踪系统对目标的跟踪性能。黑体辐射源置于转盘后方,产生较高目标温度,方便被测搜索跟踪系统来搜索跟踪小目标的运动。测试软件包括两个:一个是用来设定参数,控制步进电机带动转盘上的目标点转动;另外一个用来采集搜索跟踪系统输出的目标信息,进行计算、轨迹生成、精度计算以及测试结果判读,两个软件均安装于搜索跟踪系统的显控计算机上。

2.1 系统硬件设计

小目标轨迹模拟系统结构框图如图1所示,两个模拟目标由圆形转盘上以圆心为中心的两个对称

小孔代替,圆盘在电机驱动力的作用下可围绕中心做圆周运动。实验采用 HFY-300A 型面元黑体辐射源模拟探测目标温度,它的温度范围为室温 + 5 ~ 400 °C,有效辐射面 $\phi 120$ mm,温度分辨率 0.1 °C,温度精确度为 $\pm (0.15 + 0.002 |t|)$ °C,满足室内温度条件下实验操作的要求。黑体辐射源固定在圆盘后面产生温度辐射,辐射源温度可调,能够方便地调节和控制目标与背景温差,提供适宜的目标温度,适应各种条件下的实验环境。

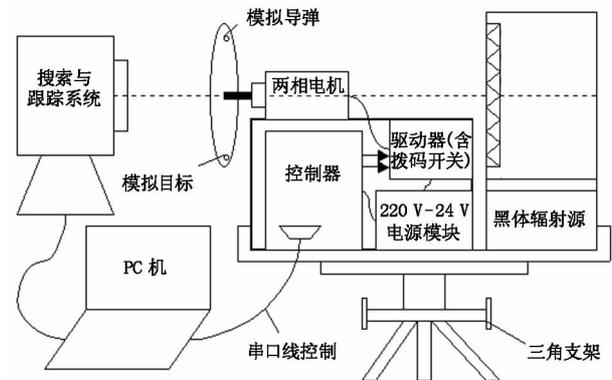


图1 小目标轨迹模拟系统硬件框图

Fig.1 hardware diagram of the small target track simulation system

系统中的模拟目标和模拟导弹的圆周运动由一套完整的PC机串口控制步进电机系统JMDM RS-485/232驱动,包括串口控制器、串口通信线、步进电机细分驱动器、220V转24V电源模块和一台两相步进电机五部分。步进电机是将脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件,在非超载的情况下,电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,即给电机一个脉冲信号,电机则转过一个步距角。这一线性关系的存在,加上步进电机只有周期性的误差而无累积误差等特点,使得在速度、位置等控制领域用步进电机来控制变得非常的简单与精确。该系统中的步进电机步距角为 1.8° /脉冲,其驱动器最高可以达到256细分,即步进电机可以达到一个脉冲只转过 0.0070° 的精度,转化为弧度制表示为 0.1 mrad。由误差理论可知,使用光学动态靶标作为光电跟踪系统测角精度的检测设备,必须事先对它的精度进行标定,只有当它的精度高于被测量设备的3倍以上时^[7],才可以使用,而该搜索跟踪系统预期达到的理论目标跟踪精度为 0.3 mrad,能够保证作为靶标的小目标与跟踪系统测角的严格同步,满足实验要求。该步

进电机最大转速可达 90000°/s,完全能满足搜索与跟踪系统保精度最大跟踪速度测试要求。电机与黑体辐射源由铁盘托架固定并由精密三角架支撑,能够严格控制其高度及水平度。

2.2 系统软件设计

小目标轨迹模拟系统由 PC 机 RS-232 串口控制步进电机驱动,软件程序采用 VB 中的 MSComm 控件对串行口进行编程,仅用一个串口就能提供步进电机控制器所需要的所有控制信号及状态检测信号。将所有信号经过电平转换芯片 MAX232 转换为 TTL 电平即可输入步进电机控制器来控制电机的运转。上位机在线控制界面提供了一般应用场合常用的运转参数设置项(如步进电机运转长度、运转速度、运转方向、送完输出延时、起步速度设定、单步加速度设定、手动速度设定等)。由于检测系统的特定需要,在 VB 程序源代码和通信协议的基础上,本研究中对程序代码进行了二次开发,重新设计软件界面,通过增加新的 Timer 控件来控制同步时间,实现了检测点的起始位置与终止位置的二维坐标显示及目标点的同步动态轨迹,软件界面如图 2 所示。同时可按指定间隔角度给出动态轨迹上逐点坐标作为比较基准,以便与红外搜索跟踪系统给出的小目标坐标进行比较,从而计算出该系统的跟踪精度。

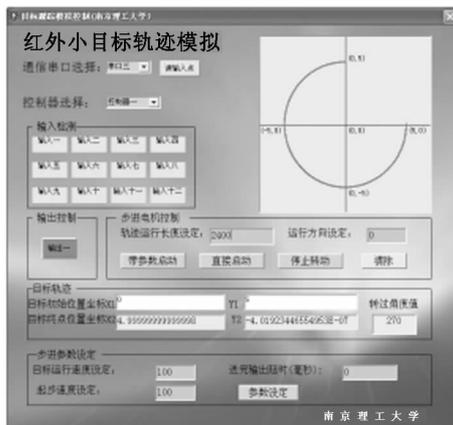


图 2 小目标模拟软件控制界面

Fig. 2 control interface of the small target simulation

2.3 小目标跟踪精度测试原理

红外搜索跟踪系统是一种在极坐标下二维角度信息的测量设备,它的测量原理为动态跟踪测量。测量时,当空间运动目标被搜索到以后,进入跟踪系统的光学测量系统视场,被其伺服系统捕获并锁定。然后跟踪系统稳定跟踪空间运动目标并保证其始终位于光学测量系统视场内。同时,记录系统记录下

空间运动目标相对于视轴的偏差——方位脱靶量 ΔA 和俯仰脱靶量 ΔE 。此外,跟踪系统的测量系统同步给出视轴的方位角 A_e 和俯仰角 E_e ,和脱靶量合成即为空间运动目标在搜索跟踪系统坐标系内的实际角度位置^[8]:

$$A = A_e + \Delta A \tag{1}$$

$$E = E_e + \Delta E \tag{2}$$

图 3 表示的是运动靶标与搜索跟踪系统在同一空间坐标系下的实际运动关系。图中 O 点为搜索跟踪系统三轴交会点, XOY 平面代表搜索跟踪系统俯仰角基准面,系统水平轴与 OY 重合,在该基准面内俯仰角度值为 90° ; YOZ 平面代表搜索跟踪系统方位角基准面; Y 轴表示小目标旋转轴, T 表示模拟目标, B 表示模拟导弹,它们在过圆心的同一条直径上且以圆心为中心作圆周运动,目标从一点运动到另一点,实际走过了 $\alpha = \omega t$ 角度所对应的一段弧, ω 为步进电机转动角速度。 α 表示模拟目标从俯仰角基准面转过角度, E 表示小目标俯仰角, A 表示小目标方位角。搜索系统跟踪图中所示目标时,它的视轴与 OT 重合,当目标从一点经过运动了 α 角度到另一点时,搜索跟踪系统视轴会同步跟踪指向目标,并实时给出目标的指向方位角度值 A 和指向俯仰角度值 E 。

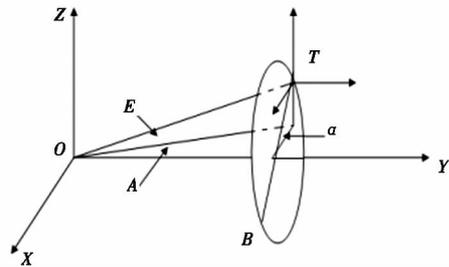


图 3 跟踪精度测试原理图

Fig. 3 schematic diagram of the tracking precision test

在该空间直角坐标系中,搜索跟踪系统三轴中心也即为入瞳中心 $O(x_o, y_o, z_o) = O(0, 0, 0)$,目标模拟孔径圆心 T 坐标: $T(x_t, y_t, z_t)$, 导弹模拟孔径圆心 B 坐标: $B(x_b, y_b, z_b)$, 目标与导弹运动平面与 XOZ 平面距离为 L , 则 $y_t = y_b = L$ 。目标点以角速度 ω 转过 $\alpha = \omega t$ 角度后目标坐标位置:

$$\begin{cases} x_t = -rcos\alpha_t = -rcos(\omega t) \\ y_t = L \\ z_t = rsin\alpha_t = rsin(\omega t) \\ \alpha_t = \omega t \end{cases} \tag{3}$$

导弹坐标位置:

$$\begin{cases} x_b = -r\cos\alpha_b = -r\cos(\pi + \omega t) = r\cos(\omega t) \\ y_b = L \\ z_b = r\sin\alpha_b = r\sin(\pi + \omega t) = -r\sin(\omega t) \\ \alpha_b = \pi + \omega t \end{cases} \quad (4)$$

则:

$$\begin{cases} \tan A_t = \frac{x_t - x_o}{y_t - y_o} = \frac{-r\cos(\omega t)}{L} \\ \tan A_b = \frac{x_b - x_o}{y_b - y_o} = \frac{r\cos(\omega t)}{L} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \tan E_t = \frac{z_t - z_o}{\sqrt{(x_t - x_o)^2 + (y_t - y_o)^2}} = \frac{r\sin(\omega t)}{\sqrt{[r\cos(\omega t)]^2 + L^2}} \\ \tan E_b = \frac{z_b - z_o}{\sqrt{(x_b - x_o)^2 + (y_b - y_o)^2}} = \frac{-r\sin(\omega t)}{\sqrt{[r\cos(\omega t)]^2 + L^2}} \end{cases} \quad (6)$$

对式(5)、式(6)求反正切得到在角速度为 ω 条件下的随时间 t 变化的方位角与俯仰角 $A_t(t)$, $A_b(t)$, $E_t(t)$, $E_b(t)$:

$$\begin{cases} A_t(t) = \arctan \frac{-r\cos(\omega t)}{L} \\ A_b(t) = \arctan \frac{r\cos(\omega t)}{L} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} E_t(t) = \arctan \frac{r\sin(\omega t)}{\sqrt{[r\cos(\omega t)]^2 + L^2}} \\ E_b(t) = \arctan \frac{-r\sin(\omega t)}{\sqrt{[r\cos(\omega t)]^2 + L^2}} \end{cases} \quad (8)$$

搜索跟踪系统能够给出点目标运动实时方位角与俯仰角值 $A'_t(t)$, $E'_t(t)$, $A'_b(t)$, $E'_b(t)$, 通过与理论值的比较计算该系统对目标或导弹的跟踪精度,也可以计算得出对目标和导弹同时跟踪时坐标测量相对误差:

$$\begin{cases} \delta A_{tb}(t) = |A_{tb}(t) - A'_{tb}(t)| \\ \delta E_{tb}(t) = |E_{tb}(t) - E'_{tb}(t)| \end{cases} \quad (9)$$

3 系统测试及结果分析

3.1 实验测量

在测试跟踪精度的室内实验中,将小目标轨迹模拟系统固定在距离搜索跟踪系统 $L = 830$ cm,即转动圆盘面距图3中 XOZ 面 830 cm,圆盘上以圆盘中心为圆心的小孔转动半径为 5 cm,小孔直径 1 mm,在该实验距离下搜索与跟踪系统的热像仪成像视场中为点目标成像。分别设定参数使得小目标在跟踪系统成像视场中以俯仰方向基准面位置为零位点转过 90° , 135° , 180° 由搜索与跟踪系统记录下

目标在视场中像素值以及实时方位与俯仰码盘值(包含实时脱靶量 ΔA 与 ΔE),通过 matlab 作图将像素值整理到直角坐标系中,其转过不同角度运动轨迹如图4~图6所示。

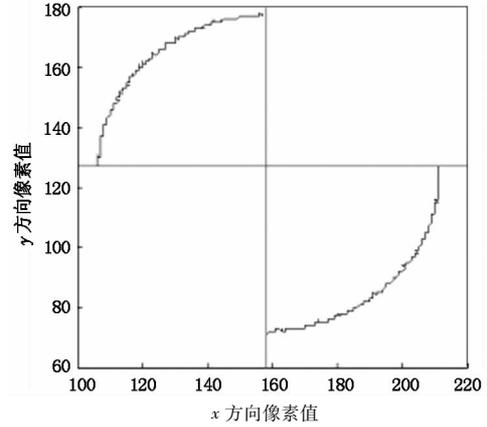


图4 双目标转过 90° 轨迹

Fig.4 track of the target turned 90°

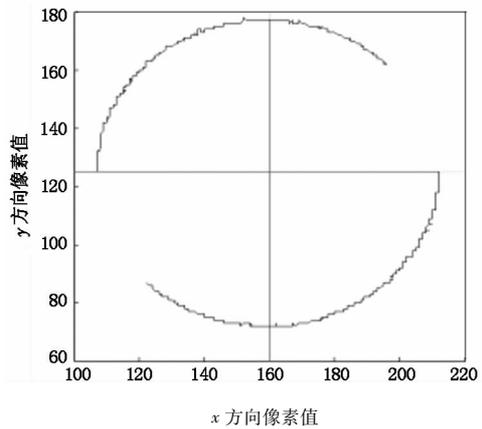


图5 双目标转过 135° 轨迹

Fig.5 track of the target turned 135°

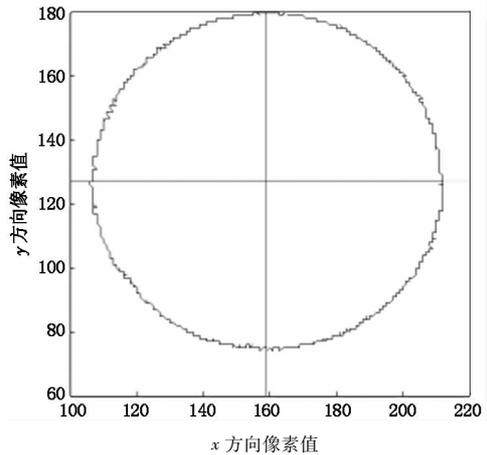


图6 双目标转过 180° 轨迹

Fig.6 track of the target turned 180°

将 $r = 5$ cm, $L = 830$ cm, $\omega t = 90^\circ$, $\omega t = 135^\circ$, $\omega t = 180^\circ$ 分别代入式(7)、式(8)算得目标点转过不

同角度时方位角与俯仰角的理论值大小。由跟踪测量系统测试软件以码盘值的形式记录下多组不同角速度下的方位角与俯仰角值,将被记录下来的码盘值以末位置减去初始零位置所得到的差值作为结果值,这样也能够消除零位差的影响,转过不同角度值情况下理论值与实测值曲线如图7所示。经过取平均值转化计算得到实际测量值的大小。在实时状态下,将转过同一角度时各不同角速度下测得的方位角与俯仰角取平均值,并与其对应理论值比较得到其测量绝对误差为:

$$\begin{cases} \delta A_{90^\circ} = |0.0110^\circ - 0^\circ| = 0.0110^\circ = 0.19 \text{ mrad} \\ \delta E_{90^\circ} = |0.3360^\circ - 0.3452^\circ| = 0.0092^\circ = 0.16 \text{ mrad} \\ \delta A_{135^\circ} = |0.2490^\circ - 0.2440^\circ| = 0.0050^\circ = 0.09 \text{ mrad} \\ \delta E_{135^\circ} = |0.2380^\circ - 0.2441^\circ| = 0.0061^\circ = 0.11 \text{ mrad} \\ \delta A_{180^\circ} = |0.3315^\circ - 0.3452^\circ| = 0.0137^\circ = 0.24 \text{ mrad} \\ \delta E_{180^\circ} = |0.0143^\circ - 0^\circ| = 0.0143^\circ = 0.25 \text{ mrad} \end{cases}$$

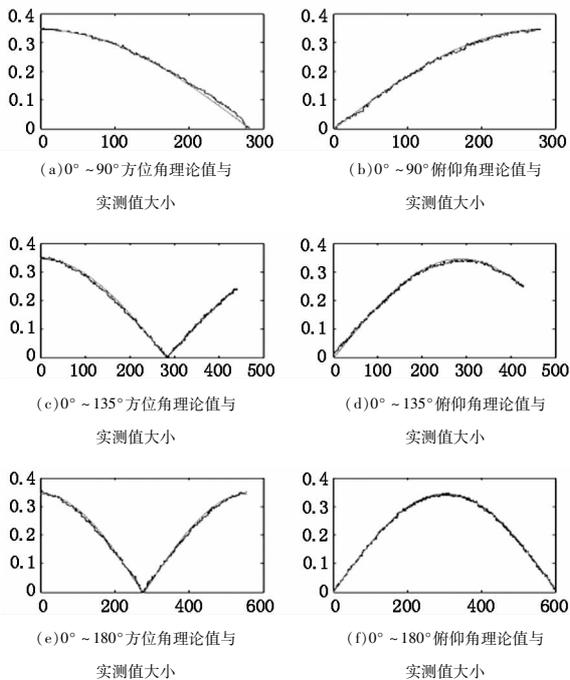


图7 三种不同方位角与俯仰角的理论值及实测值大小
(横坐标为采样点个数,纵坐标为角度值/ $^\circ$)由实际测量值连成的曲线与目标轨迹算法得到的理论曲线近似重合)

Fig. 7 theoretical and actual value of three different azimuth and pitching angles

由以上在靶标转过不同角位置 ωt 条件下计算得出的方位角与俯仰角测量误差可知,被测试搜索跟踪系统满足预期的跟踪精度 0.3 mrad ,该小目标轨迹模拟系统能够对搜索跟踪系统进行精度测试,作为搜索与跟踪系统的室内初期评价测试,能够满

足实验要求。

3.2 误差分析

小目标轨迹模拟系统的误差包括圆盘加工装配精度误差、电机运动时的震动带来的误差等系统误差以及圆盘面与搜索跟踪系统的热像仪焦平面平行度误差等。由于电机在实验要求环境条件下装配精密稳定且运行速度适中,能够平稳运行,所以电机本身的轻微震动对实验结果产生无影响。其余圆盘面加工精度、装配误差及它与探测器视场平行度三种误差从影响结果上来看都可以归结为度盘与目标运动转轴不垂直误差,即都可能导致点目标圆运动轨迹的不规则。经计算,在上述实验条件下,当转动圆盘半径 $r = 50 \text{ mm}$,倾斜高度差为 0.3 mm (该值在圆盘制造和装配中能够保证),引起的测角最大误差为 $9 \times 10^{-3} \text{ mrad}$,远小于实验预期误差 0.1 mrad 。可见,圆盘与转轴不严格垂直情况下引起的误差对于检测搜索跟踪系统的测角精度来说完全可以忽略。随着圆盘尺寸的增大,该误差随 r 的增大将越来越小,对实验结果的影响也会越来越小。由此,该小目标轨迹模拟系统的设计足以保证误差精度的要求,可以用来进行跟踪系统的室内检测。

4 结论

本研究中的小目标轨迹模拟系统以步进电机与黑体辐射源为主体,结合软件控制得到目标二维坐标轨迹与方位角、俯仰角,通过与被测搜索跟踪系统给出的目标方位角、俯仰角对比,实现了搜索跟踪系统的性能检测。该小目标轨迹模拟系统具有经济性、灵活性、精确性和针对性等优点,作为红外跟踪测量系统的室内测试具有较大的应用前景。

参考文献:

- [1] Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2383 - 2384. (in Chinese)
薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2383 - 2384.
- [2] Zhang Yuan. New scheme of ship-borne IRSTS [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 8(4): 583 - 584. (in Chinese)
张渊. 舰载红外搜索跟踪系统的新体制研究[J]. 红外

- 与激光工程,2009,8(4):583-584.
- [3] Y L Zhou, Y Q He, Y Z Wang. Small moving target detection in super field infrared image sequences[J]. Proceedings of the 8th International Symposium on Test and Measurement, 2009, 8(2).
- [4] N Acito, G Corsini, M Diani. Detection performance loss due to jitter in navalIRST systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 326-338.
- [5] Leili Hu, Yuqing Chen, State Key. Laboratory of modern optical instrumentation zhejiang university; Hangzhou; Zhejiang 310027; China. A New Algorithm of Data Process in Infrared Search and Track(IRST) System [C]. 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves Conference Digest, 2000, 9.
- [6] Guan Zhiqiang. Study on infrared target detection and recognition technology of infrared search system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
管志强. 红外搜索系统中目标探测与识别技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [7] Fei Yetai. Error theory and data processing [M]. Beijing: Machinery Technology Press, 2000. (in Chinese)
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] He Zhaoai. Optical measurement system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, (1): 198-204. (in Chinese)
何照才. 光学测量系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, (1): 198-204.
-