

红外搜索跟踪系统测试

吴学铭,王海晏,寇添,寇人可,王芳

(空军工程大学 航空航天工程学院,陕西 西安 710038)

摘要: 针对当前红外搜索跟踪系统的测试设备存在测试项目单一的问题,结合作用距离测试原理及动态靶标的研制思路,设计了一种兼顾测试作用距离及跟踪精度的测试设备。为获得良好的远距离点目标动态模拟效果,采用控温黑体与渐变式衰减片组合的方式模拟远距离目标,使用双反射镜旋臂系统模拟目标运动过程,并对测试设备控制系统进行了规划。在对测试系统各部分测试精度进行分析的基础上,对由旋臂转动造成的误差使用有限元分析软件进行重点分析,在旋臂转速为 6 rad/s 时,跟踪测试精度误差为 0.004 mrad,可以满足测试精度要求。该设计为红外搜索跟踪系统测试设备的研制及改进提供了可行的方法及理论基础。

关键词: 红外搜索跟踪系统; 测试设备; 作用距离; 跟踪精度; 误差分析

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0504003

Test of infrared search and track system

Wu Xueming, Wang Haiyan, Kou Tian, Kou Renke, Wang Fang

(Aerospace Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In view of the problem of simplicity in test project of infrared search and track system(IRST) in current, a test equipment taking into account both operating range and tracking accuracy was designed by combining the theory of operating range test and dynamic target. Temperature-control blackbody and step attenuator module were used to simulate remote target, and arm structure with double mirror has been used to simulate target movement, these could promote simulation effect of dynamic target. The control system of test equipment was designed. On the basis of analyzing test accuracy of each part of equipment, the errors were caused by rotating of arm structure were analyzed emphatically by software of finite element analysis. In the rotating speed of 6 rad/s, the error of tracking accuracy is 0.76", and equipment could meet requirements of test accuracy. The design provides feasible method and theoretical basis on developing and improving of test equipment of IRST.

Key words: IRST; test equipment; operating range; tracking accuracy; error analysis

收稿日期:2016-09-05; 修订日期:2016-10-15

作者简介:吴学铭(1991-),男,硕士生,主要从事光电探测与对抗方面的研究。Email:wuxueming1991@163.com

导师简介:王海晏(1968-),男,副教授,博士,从事光电火控技术、航空火力指挥与控制方面的研究。Email:whh_shx@sohu.com

0 引言

红外搜索跟踪系统(IRST)作为重要的机载探测设备,具有探测发现敌方目标并进行精确跟踪的能力,为光学雷达的目标获取提供了方位信息^[1]。红外搜索跟踪系统的最大作用距离和跟踪精度是其性能的衡量标准,前者会影响发现敌方目标的时机,后者则会影响系统提供给火控计算机的参数精度,对目标的截获及制导武器的命中造成影响。为获取系统性能参数,并为后续的维护和改善提供条件,针对系统作用距离和测角精度的测试就变得至关重要。

当前对红外搜索跟踪系统的测试研究主要集中在目标模拟仿真及动态靶标的研制。Richard D.B 与 Jeffrey V.R 等人为获得搜索跟踪系统在复杂背景条件下的性能评价,提出红外搜索的动态性能预测模型^[2];长春理工大学的李莹与高钰涵等人分别从大气的吸收衰减及弥散斑对红外搜索跟踪系统作用距离的影响方面,通过 LOWTRAN 等仿真软件,对系统作用距离进行优化计算^[3-4];中国科学院的关志军、张立平等人设计了双光管新型动态靶标,为光电跟踪系统进行室内检测提供了模拟的空间目标^[5]。尽管国内对于红外搜索跟踪系统性能测试的理论研究较多,且也有部分科研单位已经研制出测试装备,但是这些原型机普遍存在以下问题:

(1) 测试项目单一,只能单纯进行作用距离或跟踪精度测试;

(2) 测试仪器对当前军用机载 IRST 系统适用性不强,如动态靶标超出系统最大视场角、目标辐射模拟未考虑目标的辐射特征等;

(3) 检测设备过于庞大造成装备携行困难,设备的携行性可以保证设备能够及时出现并使用。

文中结合红外探测系统作用距离测试原理及动态靶标的研制思路,针对当前机载红外搜索跟踪系统,设计了一种兼顾测试作用距离及跟踪精度的测试设备。其作用距离测试通过黑体辐射及衰减系统模拟远距离目标辐射,跟踪精度则通过由双反射镜旋臂系统构成的动态靶标来实现。在进行动态跟踪测试时,由于旋臂结构在转动过程中会由于离心力作用导致结构的拉伸,影响光学系统的安装精度,并造成系统误差。因此,文中通过有限元分析软件 ANSYS 对旋臂拉伸情况进行定量分析,由此得出系

统误差,并为系统提供误差补偿。

1 检测原理

该测试设备面向的被测系统为目前主要装备的线阵机械扫描型红外搜索跟踪系统。为实现测试设备对红外搜索跟踪系统作用距离及跟踪精度的测量,文中分别建立了作用距离与跟踪精度检测模型,并将建模思路应用于系统内参数计算及仿真元件控制。

1.1 作用距离检测模型

红外搜索跟踪系统的作用距离是指系统在一定条件下对特定目标的最远告警探测距离,其影响因素包括目标辐射特性、大气及背景环境、光学系统及信号处理手段等。因此,对系统作用距离的检测包含目标辐射特性的仿真及大气衰减模拟。

测试系统采用特征点目标靶标模拟远距离目标红外辐射特性,靶标由黑体、平行光管与通光孔组合而成。由于黑体温度控制性较好,可以通过改变其温度模拟不同条件下目标辐射特性。因此,一方面应获取特定条件下,空中目标的红外辐射特性;另一方面应对距离测试系统进行整体标定,获取黑体温度与通光孔出射辐射强度的关系。通过对参考文献[6]中的仿真方法及结果进行总结,并结合参考文献[7-8]进行验证,得出某型飞机在特定条件下的辐射特性,如表 1 所示,该表为模拟目标辐射特性提供了较为准确的参考标准。

表 1 特定条件飞机辐射特性(1.5 Ma)

Tab.1 Radiation characteristics in certain conditions (1.5 Ma)

Altitude/km	Head	Side	Head	Side
	(summer) /w · sr ⁻¹	(summer) /w · sr ⁻¹	(winter) /w · sr ⁻¹	(winter) /w · sr ⁻¹
5	130	1 500	62.4	1 400
10	33.6	1 350	15.6	1 325

大气衰减的模拟采用多个渐变式衰减片组合的方式,通过控制工控机组合衰减片来对不同距离的衰减进行模拟。通过查阅参考文献[9-10],获得不同高度及相对湿度条件下 CO₂ 及水蒸气的光谱吸收系数,并通过计算,获得不同距离、高度、相对湿度及能见距条件下的大气透过率,如图 1 所示。在测试过程中,通过调节无级渐变式衰减片模组来模拟由远及近的距离,并以红外搜索跟踪系统首次产生稳定信

号作为临界, 则衰减片模组对应的传输距离即为红外搜索跟踪系统在该探测条件下的作用距离。

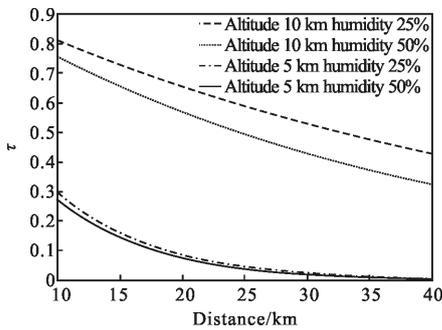


图 1 不同条件下大气透过率

Fig.1 Atmospheric transmittance in different conditions

1.2 跟踪精度检测模型

对红外搜索跟踪系统跟踪精度的测试采用动态靶标的手法, 将作用距离测试系统的出射平行光作为点光源靶标, 动态过程采用双反射镜悬臂结构进行模拟, 原理简图如图 2 所示。

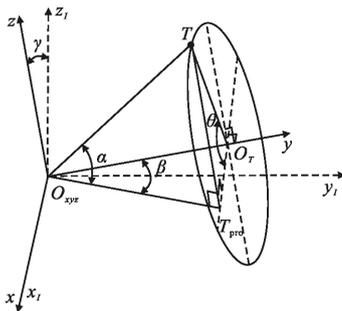


图 2 跟踪精度测试原理简图

Fig.2 Sketch of tracking accuracy test principle

在检测中, O_{xyz} 为红外搜索跟踪系统的光学焦点, 由旋转中心到探测系统光学焦点的距离为 L ; 动态目标 T 在以 O_r 为平面, R 为半径的圆内作匀速圆周运动, 作为可进行辐射强度计算的远距离点目标, 其入射光路为 $O_{xyz}T$; $O_{xyz}T$ 与 $xO_{xyz}y$ 平面的夹角 α 即为 xyz 坐标系下的俯仰观察角; 入射光路投影线 $O_{xyz}T_{pro}$ 与 y 轴夹角 β 即为 xyz 坐标系下的方位观察角。红外靶标 T 在 xyz 坐标系中的坐标如公式(1)所示。

$$\begin{cases} X_T=R \cdot \cos\theta \\ Y_T=L \\ Z_T=R \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为靶标在时间 t 内转过的角度。由于该型红外搜索跟踪系统的探测俯仰角范围为 $-15^\circ \sim 60^\circ$, 探

测方位角范围为 $\pm 60^\circ$, 且测试设备在设计中应满足动态目标在运动过程中完全处于探测系统视场角范围内, 则将原坐标系中的 y 轴作为探测系统的中心视场线, 地面坐标系 $x_i y_i z_i$ 即为原坐标系 x 轴顺时针转过 γ 角得来, 其中 $\gamma=22.5^\circ$ 。靶标 T 在新的坐标系下的坐标计算采用欧拉法进行变换, 其变换过程及结果如公式(2)所示。需要说明的是, 对于具有不同视场角的系统, 该测试系统依然可以通过改变旋臂内反射镜装配角度及测试系统安装角度的方式来适应新的视场角。

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos\theta \\ L \cdot \cos\gamma - R \cdot \sin\theta \cdot \sin\gamma \\ L \cdot \cos\gamma + R \cdot \sin\theta \cdot \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

在得出靶标在新坐标系下的坐标后, 即可根据公式(3)得到该坐标系下的俯仰与方位角, 对其求导后, 又可得出相应的俯仰与方位角速度参数, 为与探测系统测量值进行对比提供参照。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{Z_I}{\sqrt{X_I^2 + Y_I^2}} \\ \beta = \arctan \frac{X_I}{Y_I} \end{cases} \quad (3)$$

2 测试系统总体设计

2.1 平台结构设计

测试系统由两部分组成: 作用距离测试部分及跟踪精度测试部分, 框架简图如图 3 所示。距离测试

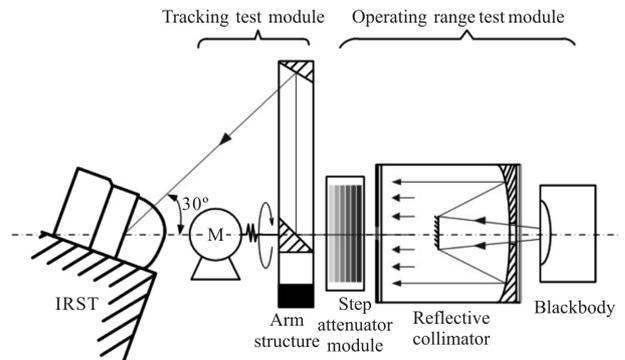


图 3 测试系统框架

Fig.3 Frame of test system

部分由温度可控的黑体及平行光管组成。由于测试系统对整体尺寸要求严格, 因此平行光管采用反射式卡塞格林系统, 且平行光管与黑体之间应加装聚

光透镜,以增强有效光强。大气衰减采用渐进式衰减片组与驱动电机构成,渐进式衰减片的特点是在同一衰减片上划分出不同衰减强度的区域。为将衰减精度精确到千分位,衰减片组由至少 4 块无级渐进式衰减片构成,并由配有编码器的步进电机驱动,通过对不同大小及精度的渐进式衰减片进行组合,达到对任意距离下大气透过率的模拟。

跟踪精度测试部分则采用动态靶标,通过编码器及工控系统获取靶标的实时方位信息并与红外搜索跟踪系统的测量数据进行对比来获得被测系统的跟踪精度。该测试系统中,采用配有编码器的力矩电机驱动双反射镜旋臂的方式模拟动态运动目标,旋臂结构如图 4 所示。力矩电机选用可直接连接工业用电的三相异步电机,并配以变频器调整其转速。为减小质量并拥有较好的结构稳定性,旋臂采用桁架结构,材料为密度小且机械性能较好的铸铝合金,总长为 850 mm;反射镜倾角分别为 30°和 45°,材料采用硬铝合金,且表面镀硬质合金,防止氧化;为实现结构的动态稳定性,在旋臂一侧根据一定转速下各部分转动惯量的计算加装配重块,配重块采用密度较大的黄铜材料,质量为 7.2 kg。

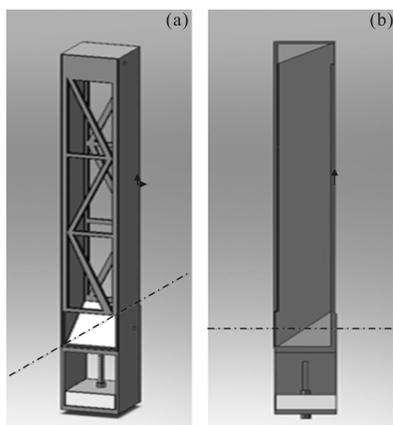


图 4 旋臂结构及其剖视图

Fig.4 Arm structure and section view

2.2 控制系统设计

控制系统采用现有技术及设备,由工控机、I/O 接口、功率级等部分组成并采用 PID 控制算法,对测试系统各部分进行闭环控制,控制系统结构如图 5 所示。工控机的输入端参数为目标辐射特性及距离变量,其中目标辐射特性由之前建立的数据库进行选择调入,距离变量则按固定步长由大到小调入

数据库中相应大气透过率,并经由调宽输出及功率级控制渐进式衰减片电机进行衰减模拟。红外搜索跟踪系统由工控机直接下达指令,并在有效信号产生时反馈至主控计算机,则此时衰减对应的大气距离即为系统作用距离。

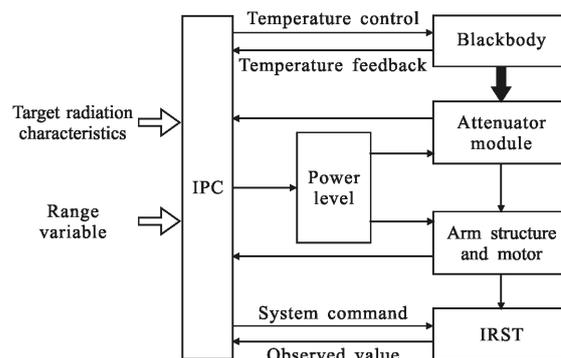


图 5 控制系统结构

Fig.5 Frame of control system

模拟动态靶标的旋臂系统,由工控机给出旋转角度及角速度信息,并实时通过旋臂编码器提供的角度信息进行反馈调节。该系统可控制旋臂按给定角度及角速度进行静止和圆周运动。在静止过程中,作用距离测试部分进行工作,并得出搜索跟踪系统作用距离;运动过程中,将旋臂编码器提供的目标实际方位信息与搜索跟踪系统反馈的测量方位信息进行对比,得出跟踪精度。

3 测试精度分析

由于红外搜索跟踪系统作用距离受到目标及背景辐射特性、大气衰减、气象环境、光学系统及信号处理等多方面影响,测试设备仅能通过模拟部分条件对搜索跟踪系统进行标定。因此,讨论作用距离测试精度应结合具体条件进行分析,其误差来源主要有两大方面:一是测试系统对条件模拟不够准确,如黑体对目标辐射源的模拟并不能完全反应其真实辐射特性,大气衰减模拟也未能考虑到大气湍流等因素;二是测试仪器本身存在系统误差,这些误差主要是由于辐射强度与黑体温度未能准确对应导致的。其标定过程可分为以下步骤:

- (1) 估算飞行目标红外辐射的数值范围,以确定是否超出黑体可提供最大辐射量;
- (2) 测量不同的黑体温度下,对应探测波段的红

外辐射量；

(3) 由于黑体的加热温度限制,在其最大辐射量小于实际目标的辐射量时,可在比较二者差距后,设定一合理比值,并作为固定的大气衰减量,代入大气衰减的计算中。此时,距离测试存在由固定衰减量引起的测试距离下限。

为模拟动态靶标而设计的旋臂系统,由于长度较长,且处于旋转状态,在增加反射镜及配重后,内部应力较大,旋臂变形较为明显,是造成跟踪精度测试系统误差的重要因素。对旋臂变形的分析如图 6 所示。

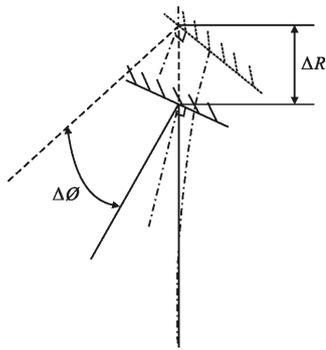


图 6 旋臂变形分析

Fig.6 Analysis of arm deformation

旋臂变形引起的测试精度误差主要分为两部分:一是由于旋臂纵向拉伸造成反射镜位置偏移,即图 6 中 ΔR ;二是由于旋臂前后两侧拉伸长度不一致,导致反射镜发生角度偏转,并进一步造成光线偏转,即图 6 中 $\Delta\phi$ 。由于以上两点均需要对旋臂各处形变量进行精确计算,因此,文中采用有限元分析软件 ANSYS 对旋臂各处应变进行仿真。由于旋臂运动方式为匀速转动,且载荷大小固定不变,因此,可采用软件中结构静力学分析模块 (Static Structural) 进行计算。为简化仿真过程,旋臂中的反射镜及配重均先通过计算获得其在一定转速下的转动加速度,并计算出在转动过程中对旋臂作用力的大小及位置。设定旋转角速度为 6 rad/s,旋臂应变仿真结果如图 7 所示。

仿真结果显示:旋臂结构变形较为平稳,未出现断裂及应力集中,满足强度要求。旋臂结构中应变最大的位置集中于安装反射镜及配重的两端,且旋臂中段应变变化较小,拉伸均匀;通过云图可以看出,在 z 轴方向上,其负方向应变比正方向应变数值更大,

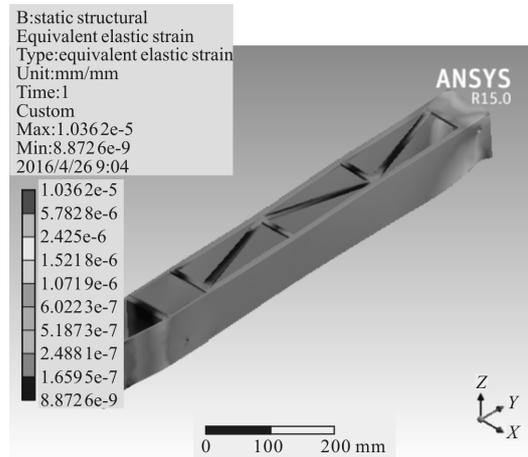


图 7 旋臂结构等效应变结果

Fig.7 Equivalent elastic strain of arm structure

这就是造成旋臂弯曲变形的原因。在此基础上,为精确计算总体拉伸量,可在结构侧面中线位置设置路径,并进行总体变形计算,路径上个点偏移量如图 8 所示。

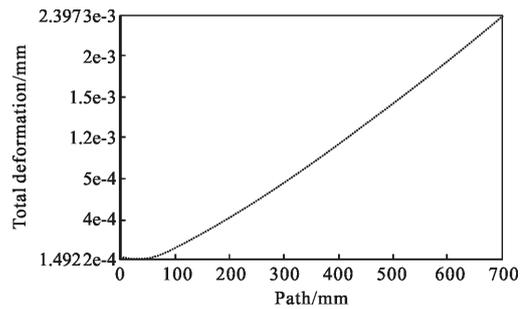


图 8 路径总体形变量

Fig.8 Total deformation on path

由路径形变量数据即可得出,反射镜偏移 $\Delta R=2.3973 \times 10^{-3}$ mm。反射镜偏移造成的靶标方位角误差可由公式(4)计算。

$$\sigma_r = \left(\arctan \frac{\Delta R + R}{L} - \arctan \frac{\Delta R}{L} \right) \times 2 \quad (4)$$

式中: L 为旋转中心到搜索跟踪系统焦点的距离,计算结果为 $\sigma_r=0.67''$ 。

反射镜角度偏转可通过计算旋臂两侧棱边形变量引起的横向界面偏转求得。计算两棱边的形变量的方法同上述设置路径求中线形变量的方法相同,其分别为 $\Delta R_1=2.3921 \times 10^{-3}$ mm、 $\Delta R_2=2.4118 \times 10^{-3}$ mm。在此基础上,通过公式(5)即可求出由反射镜角度偏转引起的误差为 $\sigma_\varphi=0.09''$ 。式中 $d=90$ mm 为旋臂顶边棱长。

$$\sigma_{\psi}=2 \times \arctan \frac{\Delta R_2-R_1}{d} \quad (5)$$

由此,通过直接相加即可得出旋臂以 6 rad/s 的角速度转动而导致的测试精度误差为 $\sigma_{\text{am}}=0.76''=0.004 \text{ mrad}$ 。通过以上方法求得的精度误差,也可用于其他旋转角速度的情况,并通过误差补偿的方式增加测试系统跟踪精度。除旋臂转动引起的误差外,跟踪测试系统的误差来源还包括:平行光管安装误差导致平行光偏离反射镜中心;反射镜装配误差导致的光线偏转;动态靶标出射光线未对准搜索跟踪系统焦点等。这些误差均可由实际操作过程中的精确安装来减小,也可通过精确测量方法获得,并进一步计算测试系统总体误差。

除以上主要误差因素外,复杂背景环境的忽略及设备内部的自身辐射都会对测试结果产生影响。对于前者,可将复杂背景环境等效为产生相同光学噪声的背景辐射,在计算机中计算出辐射强度,并作为对目标辐射的衰减加入到特征点靶标模拟中;对于后者,则可在设备装配完成后,在暗室中对设备内的热辐射进行整体的测量,若其值过小则对其忽略,若不可忽略,则将该值结合测试中透过率计算出其等效的衰减前辐射量,并在模拟目标辐射过程中去掉该辐射量,以消除由于系统内部热辐射而造成的影响。

4 结 论

文中结合红外搜索跟踪系统作用距离测试方法及动态靶标测试原理,从总体上设计了针对搜索跟踪系统作用距离及跟踪精度的测试系统。通过控温黑体及渐进式衰减片组来模拟经大气衰减的目标辐射,并通过控制距离变量获得系统一定条件下的作用距离;设计双反射镜旋臂系统模拟动态目标,通过将目标实际方位与跟踪系统观测方位进行对比获得其跟踪精度。在测试系统数学原理及精度分析方面得出如下结论:

(1) 为增强测试设备对不同探测系统视场角的适用性,旋臂内反射镜及设备整体支架均采用可变角度设计,以使动态靶标能够完全处于视场中;

(2) 在设计控制系统前,应通过获取的权威数据并结合仿真或测试的方式获取大气衰减及目标辐射特性,并建立相应数据库,以增强测试系统模拟的真实性;

(3) 旋臂结构强度满足要求,且变形幅度较小,通过仿真软件精确计算出形变量,可用于旋臂转动引起的误差计算;

(4) 旋臂在 6 rad/s 转速下引起的跟踪测试系统误差为 0.004 mrad,而该型跟踪系统精度则远低于 0.012 mrad,即测试设备精度高于被测设备 3 倍以上,因此该测试系统可以满足跟踪测试的精度要求;

(5) 经过对测试设备内部结构的计算和统计,该测试设备最高点不超过 1.5 m,最长不超过 2 m,宽度约 1.5 m,测试设备体积较小,可携行运输,且结构较为简单,由于采用三相异步电机驱动动态靶标,可直接连接工业用电并配变频装置对转速进行调节。需要注意的是,为保证测试设备在携行过程中,内部精密光学仪器不会因震动而造成精度损失,需对设备整体结构进行防振设计,必要时也可将内部精密光学仪器取出,待使用时则重新进行准直及标定。

由于该测试设备目前处于理论设计及可行性讨论中,其中还存在一些不足,但文中在测试系统的设计思路中提供了一种可行的办法,为设备具体的研制及改进工作提供了基础。

参 考 文 献:

- [1] He Jie. Research and simulation implementation of the airborne infrared search and tracking system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 2-5. (in Chinese)
何杰. 机载红外搜索跟踪系统研究与仿真实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 2-5.
- [2] Brewer Richard D, Richard Jeffrey V, McGlynn John D. An IR seeker/ sensor dynamic performance prediction model[C]// SPIE, 1995, 2470: 89-97.
- [3] Li Ying. The research on operating range of infrared system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 35-42. (in Chinese)
李莹. 红外系统作用距离的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 35-42.
- [4] Gao Yuhan. Research of infrared search system operating range [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 24-27. (in Chinese)
高钰涵. 红外搜索系统作用距离的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 24-27.
- [5] Guan Zhijun. Study on new dynamic target [D]. Beijing:

- The Graduate School of the CAS, 2005. (in Chinese)
关志军. 新型动态靶标的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [6] Mu Da, Wang Jianli, Chen Tao. Analysis on operating range of a staring infrared search and track system for high-speed aircraft[J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 0420–0423. (in Chinese)
牟达, 王建立, 陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析[J]. 光学技术, 2007, 32(3): 0420–0423.
- [7] Liu Juan, Gong Guanghong, Han Liang, et al. Modeling and simulation infrared characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209–1213. (in Chinese)
刘娟, 龚光红, 韩亮, 等. 飞机红外辐射特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1209–1213.
- [8] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Lu Yanlong, et al. Study on airplane's infrared radiation characteristics [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 40(9): 0996–1001. (in Chinese)
王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 40(9): 0996–1001.
- [9] Mao Xia, Hu Haiyong, Huang Kang. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(10): 1228–1231. (in Chinese)
毛峡, 胡海勇, 黄康. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1228–1231.
- [10] Wu Hanping. Infrared Search System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 48–60. (in Chinese)
吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 48–60.