

文章编号: 1005-5630(2022)04-0010-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.004.002

一种红外辐射特性测量教学训练系统

胡长德¹, 张海波¹, 王朝晖¹, 王林旭¹, 李子杨¹, 刘 婕²

(1. 航天工程大学士官学校, 北京 102200;

2. 航天工程大学职业教育中心, 北京 101416)

摘要: 提出了一种红外辐射特性测量教学训练系统。利用该系统, 结合红外辐射特性测量设备的任务及结构原理, 设计了近 20 个操作科目; 并阐述了红外辐射特性测量系统标定原理, 实现了红外辐射特性测量教学系统的软硬件系统设计; 研究并确立了红外探测器指标测试操作科目的计算模型。经实验验证, 该系统能满足教学训练要求, 有助于士官院校学员对红外辐射特性测量系统原理、结构的学习和掌握。

关键词: 红外辐射特性测量; 教学训练系统; 响应率; 迟滞

中图分类号: TH 745 **文献标志码:** A

A teaching and training system for infrared radiation characteristics measurement

HU Changde¹, ZHANG Haibo¹, WANG Zhaohui¹, WANG Linxu¹, LI Ziyang¹, LIU Jie²

(1. College of Non-commissioned Officer, Space Engineering University, Beijing 102200, China;

2. Vocational Education Center, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: A teaching and training system for infrared radiation characteristics measurement is presented. Based on the task of infrared radiation characteristic measurement equipment and the principle of equipment structure, nearly 20 operation subjects were designed. Firstly, the calibration principle of infrared radiation characteristic measurement system was described. Then, the software and hardware system of infrared radiation characteristic measurement teaching system were designed and implemented. The calculation model of infrared detector index test operation subject was studied. Finally, a series of experiments were carried out, and they showed that the system could achieve the requirements of teaching and training.

Keywords: infrared radiation characteristics measurement; teaching and training system; responsivity; hysteresis

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 省部级军队项目 (1-1-9-4)

作者简介: 胡长德(1981—), 男, 讲师, 研究方向为光学测量。E-mail: hansen1981108@sohu.com

引言

直至20世纪70年代中期,反导防御系统一直采用雷达探测识别目标。随着反雷达识别技术不断提高,采用雷达从大量干扰物中识别出弹头变得愈来愈困难。而因为弹头、弹体、诱饵等目标在高速飞行中的温度变化及其热辐射有着很大差别^[1-3],运用红外技术进行目标识别就具有一定优势。在高度深冷空间,轻诱饵由于本身热容量小,其表面温度将下降很快,而弹头的温度变化却很小,因此可以利用彼此“冷热”的不同来区分真假目标。目前,红外辐射特性测量设备越来越多地被运用到了导弹突防性能鉴定试验中。这些设备的操作维护一般由士官来完成。因此在士官院校的日常工作训练中,就必须配备红外辐射特性测量设备,用以学习相应的结构原理,训练相应的操作技能。而现在用于武器鉴定试验的红外辐射特性测量设备往往价格昂贵,耗资均在千万元以上,在士官院校很难实现按需配备。且用于执行任务的红外辐射特性测量设备的集成化程度高,操作与任务结合紧密,一些核心器件本身的指标,如红外相机的响应率、迟滞、重复性等,无法在现有测量设备中检测获得。而这些指标参数对于学员更好地学习理解设备组成原理,掌握操作技能,进而获取更精确的任务数据具有重要作用^[4-6]。因此,研制价格相对低廉、具备实践教学功能的的教学系统就显得尤为必要。

本研究提出了一种红外辐射特性测量教学系统,采用非制冷普通红外相机、黑体以及红外辐

射特性测量软件。该系统价格不到20万元/套,仅为实装设备售价的百分之一。除了具备实际设备所具有的辐射特性测量、标定及非均匀性校正等操作科目外,所提出的教学系统还增加了诸如响应率、迟滞、重复性等红外辐射特性测量系统中红外相机器件相关指标测试的实践科目。操作科目总计近20个,对于该系统的结构、原理学习大有帮助。

1 红外辐射特性测量系统的组成

结合红外辐射特性测量的设备任务及岗位要求,除设备和岗位的操作测试外,本教学系统增加了红外探测器这一核心器件的指标探测,同时增加典型材料红外辐射特性数据库,以帮助进行目标分析与识别。

1.1 红外辐射特性测量系统硬件组成

红外辐射测量系统的组成如图1所示,由非制冷型红外探测器、光学镜头、黑体和红外辐射测量软件组成。该系统可以根据获取的红外图像数据,反演出目标的红外辐射亮度和亮温。首先由光学镜头收集来自目标的红外辐射,经红外探测器转换为电信号,再经红外探测器接口电路送至数字处理板进行处理,然后通过主机显示并由辐射测量处理软件完成相应处理。具体实物图见图2。

1.2 红外辐射特性测量系统软件组成

辐射测量处理软件由计算机和对测量图像数据进行处理分析的各种软件组成,具有目标辐射

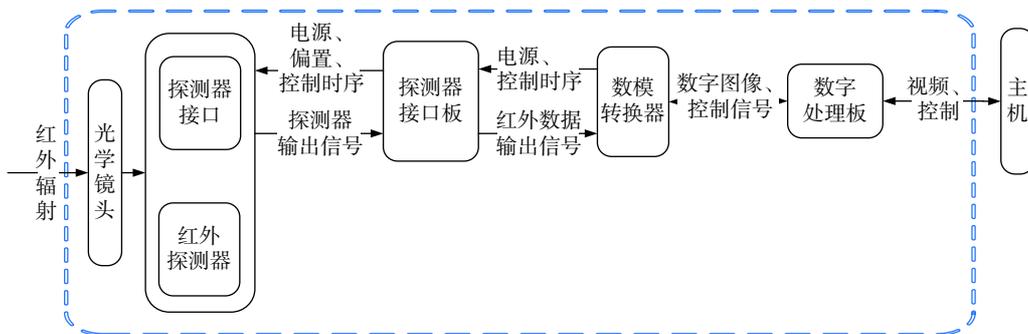


图1 红外辐射特性测量系统原理图

Fig. 1 Principle of the infrared radiation characteristic measurement system



图 2 红外辐射特性测量系统实物图

Fig. 2 Photo of the infrared radiation characteristic measurement system

功率、辐射强度、辐射出射度、红外探测器性能等指标的测试功能。辐射测量处理软件均基于 Windows 平台，运用 VC 语言编程。在软件设计的过程中重点考虑了可重用性和可扩展性。可重用性是指所设计的代码不作修改或稍加改动就可多次重复使用；可扩展性是指随着红外辐射测量技术的不断发展，其功能可不断加以完善。

从功能划分，红外辐射特性测量系统软件主要包括辐射测量控制软件模块和数据综合处理软件模块。辐射测量控制软件模块：完成辐射测量系统的各项控制管理功能；提供标定过程中所需的软件支撑；定义红外辐射标定单元的软件接口；将标定数据结果供其他模块使用。数据综合处理软件模块：精确计算各项辐射测量、反演及材料分析识别结果，并形成分析报告。

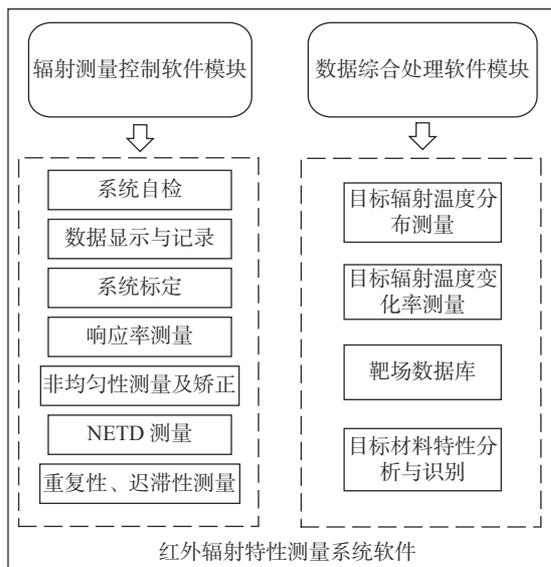


图 3 红外辐射特性测量系统软件逻辑组成框图

Fig. 3 Diagram of the infrared radiation characteristic measurement system with interpolation

由图 3 可知，系统软件的工作流程如下：

1) 辐射测量控制软件模块

辐射测量控制模块主要包括系统设置、系统自检、定标和测量控制、数据显示、数据记录和回放等功能，并在用户信息窗口显示系统当前工作状态（正常或异常）、自检结果，以及定标和测量控制、数据接收等功能模块的工作信息。

红外辐射测量数据显示功能主要完成目标红外图像、温度分布、波段辐射亮度分布等测量数据的处理和分析。实时显示计算的 X 轴和 Y 轴的温度曲线；实时计算和显示最高温度、最低温度、平均温度、任意点温度值及其坐标；计算矩形区域内/外温度的最高值、最低值、平均值；三维方式显示图像；放大图像中任意区域。红外探测器指标测试包括响应率测量、迟滞测量、重复性测量、非均匀性测量及校正等。

2) 数据综合处理软件模块

数据综合处理模块主要对红外探测器和辐射标定采集的图像和数据进行预处理、综合计算分析，反演计算目标和背景在当时气象条件下的真实红外辐射特性（温度分布、温度变化率测量），并将结果信息存储，建立靶场数据库，并根据数据库中已有的材料辐射特性进行目标材料的分析识别。

2 红外辐射特性测量系统标定原理

红外跟踪与测量分系统的主要功能是对目标的红外辐射量进行测量，因此就需要对系统的辐射响应进行精确标定^[5]。其具体标定方法如下：

在实验室采用均匀辐射圆形孔状的标准黑体源作为均匀红外辐射目标，该目标通过辐射计光学系统成像在辐射计探测器红外焦平面上。平行光管是无挡光的离轴光学结构，其口径大于辐射计望远镜口径，黑体孔的像大于红外焦平面一个单元的面积。标定时采用中心点标定。

在系统的工作动态范围中取一系列不同的黑体辐射温度作为红外辐射标定点。直接改变黑体辐射温度，可从被测系统的辐射响应信号输出中得到一系列测量值，该响应值经模数转换后用灰度级表示。由此可得到被测系统辐射响应值同黑体目标辐射量的对应曲线^[7-8]。

根据普朗克黑体辐射定律,黑体在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段中的辐射发射量为:

$$W = C_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

式中: $C_1 = 3.7415 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$; $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$ 。

对充满红外焦平面一个像元的黑体目标,入射在该敏感单元上的辐射功率为:

$$P = \tau_0 A_0 W \frac{\omega}{\pi} \quad (2)$$

式中: τ_0 为光学系统透过率; A_0 为望远镜通光面积; ω 为系统瞬时视场。

辐射计焦平面单元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$, 光学系统焦距为 48.3 cm , 瞬时视场立体角为 $\omega = 4\mu^2 = 6.86 \times 10^{-3} \text{ Sr}$ 。那么黑体在系统入射孔径上的辐射照度 H 与黑体辐射发射量 W 的关系为:

$$H = P/(\tau_0 A_0) = \omega W/\pi = 2.188 \times 10^{-3} W \quad (3)$$

定标时,将黑体设定在不同的温度 T , 计算出 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的黑体辐射发射量 W , 进一步得到系统入射孔径上的辐射照度值。当系统输出信噪比为 1 时即为系统的噪声等效辐射照度(即系统的灵敏度)。辐射计用 H 进行标定,得到灰度级与辐射照度的曲线。

各灰度等级 G 对应的目标辐射照度 H 可按下式计算:

$$G_0 = 1.439W = 1.439\pi H/\omega = 659H \quad (4)$$

式中: G_0 为显示灰级值(满度为 256 灰级); W 为黑体辐射发射量; H 为辐射照度。

当得到辐射计输出的灰度级后,先根据目标所在区域和波段进行非均匀性校正,而后通过定标曲线得到照度值 H , 即可计算出实际目标的辐射强度^[9-12]。

3 红外探测器指标测试科目设计与实现

3.1 红外探测器指标测试科目设计

为了更好地理解辐射特性测量设备的工作原理,掌握辐射特性测量设备的操作技能,在研究和设计该系统时增加了红外探测器指标测试操作

科目。这些指标参数可以通过手动测试计算,也可以通过软件自动计算获得。下面主要阐述响应率、迟滞这两个指标测试操作科目的设计实现。

3.2 红外探测器指标测试科目计算模型

1) 红外探测器响应率测量

红外探测器的响应率表征的是探测器对于目标红外辐射的响应程度。即探测器电输出信号的基本量与输入功率基本量的比值,单位是 V/W 。

$$R = \frac{U_\lambda}{P_\lambda} \quad (5)$$

式中: U_λ 为来自目标的均值波长为 λ 的红外辐射经探测器转换输出的电压值; P_λ 为来自目标的均值波长为 λ 的红外辐射功率。对于已知温度的黑体,其辐射功率也是已知的。探测器的口径也是一定的,比黑体要小,在进行实际操作时,红外探测器与黑体的距离很近,可以忽略掉大气衰减,实际进入探测器能量与红外探测器的口径成正比^[13-15],假设探测器口径和黑体面积的比值为 α , U_λ 为红外探测器实际输出。

对于该操作科目,检测时设置一系列黑体温度 (N 个),分别为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$, 分别记录对应的红外辐射功率 $P_{\lambda 1}, P_{\lambda 2}, P_{\lambda 3}, \dots, P_{\lambda N}$, 红外探测器输出电压值 $U_{\lambda 1}, U_{\lambda 2}, U_{\lambda 3}, \dots, U_{\lambda N}$ 。可以得到响应率为:

$$R = \alpha \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_{\lambda i}^2 / N}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N P_{\lambda i}^2 / N}} \quad (6)$$

2) 红外探测器迟滞测试

迟滞是指传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出不一致的程度。该指标说明,红外探测器在测量目标时,对于升温目标与降温目标,同样的温度变化,其输出结果不一致的程度^[16-17]。

对于该科目,检测时设置一系列正(升温)行程黑体温度 (N 个),分别为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$, 分别记录对应红外探测器输出灰度值 $H_1, H_2, H_3, \dots, H_N$ 。然后开始降温,设置同样的反(降温)行程黑体温度 (N 个),分别为 T_N, T_{N-1} ,

T_{N-2} 、 \dots 、 T_1 ，分别记录对应的红外探测器输出灰度值 H'_N 、 H'_{N-1} 、 H'_{N-2} 、 \dots 、 H'_1 。不难看出，最大灰度值为 H_N ，即 $H_N = H'_N$ 。则迟滞 γ 为：

$$\gamma = \frac{(H_i - H'_i)_{\max}}{H_N} \quad (7)$$

式中： i 为自然数， $1 \leq i \leq N$ ； $(H_i - H'_i)_{\max}$ 为正行程中同温度值时的最大差值。

4 实验验证

红外辐射特性测量系统实验如图 4 所示，由黑体辐射源、光学镜头、红外相机、辐射测量软件组成。根据任务及教学训练要求，主要阐述分析标定、目标红外辐射特性、红外探测器迟滞实验结果。

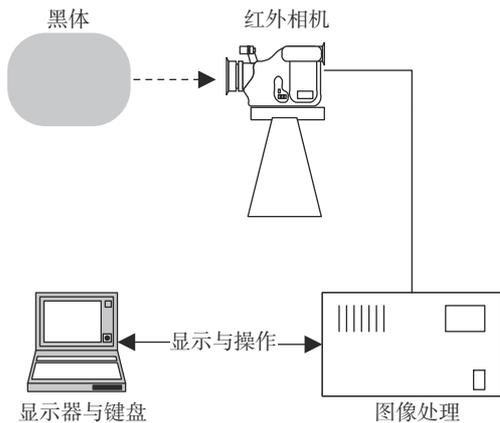


图 4 红外辐射特性测量系统实验组成

Fig. 4 Experimental composition of the infrared radiation characteristic measurement system

4.1 标定实验

选择自动定标，自动定标参数起始温度设置为 30 ℃，截止温度设置为 200 ℃，步长为 5 ℃。重复定标 5 次，获得定标系数如表 1 所示。

表 1 定标数据
Tab. 1 Calibration data

序号	1	2	3	4	5	平均值
系数 K	136.6	136.8	135.5	137.3	135.8	136.4
偏移量 B	1904.3	1898.1	1988.2	1852.3	1970.1	1922.6

由表 1 数据可得，该系统的红外辐射响应和温度变化基本呈线性关系，在 30~200 ℃ 的范

围内的响应系数为 136.4。

4.2 目标红外辐射特性实验

完成标定后，在红外辐射特性测量反演软件中导入标定实验的实验结果，系数 K 和偏移量 B ，对实测目标红外辐射特性进行测量，获取数据如表 2 所示。

表 2 目标红外辐射特性实验数据
Tab. 2 Experimental data of the infrared radiation characteristics of the target

最大灰度	最小灰度	平均灰度	最大温度/K	最小温度/K	平均温度/K
9768	7066	8966	593.2	573.3	587.3

由表 2 数据可得，该系统可以进行目标温度和目标温度分布测量，具备目标特性分析功能，能够完成该方面的实践教学。

4.3 红外探测器迟滞实验

按照 3.2 节中分析得出的迟滞计算模型式 (7)，测试红外探测器对黑体温度在 30~100 ℃ 响应迟滞情况。从 30 ℃ 开始，每间隔 5 ℃ 记录 1 次，依次获得黑体温度正(增大)行程时的探测器响应值。然后从 100 ℃ 开始记，依次记录黑体温度反(减小)行程时的探测器响应值。所得数据如表 3。

表 3 红外探测器迟滞实验数据
Tab. 3 Experimental data of the infrared detector hysteresis

正反行程最大差 $(H_i - H'_i)_{\max}$	满量程 H_N	迟滞 γ
467	15064	0.031

由表 3 的数据可得，该系统的迟滞为 0.031，能够帮助完成红外辐射特性测量系统迟滞指标测试实践教学，有助于学员进一步理解红外辐射特性测量系统。

5 结 论

提出了一种红外辐射特性测量系统。该系统结合红外辐射特性测量设备任务及设备结构原理，设计了近 20 个操作科目，阐述了红外辐射特性测量系统标定原理，设计实现了红外辐射特

性测量教学系统的软硬件,研究并确立了红外探测器指标测试操作科目的计算模型。最后进行了一系列的实验验证,结果表明该系统能满足教学训练要求。所设计的系统对于士官院校日常教学中红外辐射特性测量系统原理、指标参数的学习大有帮助。

参考文献:

- [1] 刘莹奇,刘祥意.空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J].光学学报,2014,34(5):0512003.
- [2] 陈书恒,朱倪瑶,陈宁,等.飞机红外辐射特性测试及红外干扰弹投放方式研究[J].红外技术,2021,43(10):949-953.
- [3] 洪泽华,章佳君,周金鹏,等.复杂目标红外辐射特性大数据知识表示及建模方法[J].上海航天,2020,37(06):52-57.
- [4] 钱坤,龚旻,陈梅,等.便携式防空导弹装备现状及发展趋势分析[J].现代防御技术,2020,48(5):32-37.
- [5] 马贤杰,李国平,王洪静,等.国外红外导引头及红外诱饵发展历程与展望[J].航天电子对抗,2020,36(3):58-64.
- [6] 李保霖,蔡立华,张涛,等.基于长波红外成像系统的红外辐射特性测量方法[J].红外,2018,39(6):15-20.
- [7] 胡长德,高娟,王林旭,等.一种光电经纬仪目标仿真训练系统的研究[J].光学仪器,2017,39(3):82-89.
- [8] 刘亮.某型装备模拟训练系统研究与设计[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [9] 王智平,吴统邦,李周,等.一种通用的红外辐射特性测量技术[J].红外,2020,41(8):29-35.
- [10] 杨翔云,吕勇,刘洋,等.靶标系统中的目标红外特性建模技术研究[J].激光与红外,2021,51(10):1336-1341.
- [11] 祝念,高思莉,岳娟.高速飞行目标尾焰红外辐射特性的建模仿真计算[J].红外,2018,39(5):8-12.
- [12] 谷牧.基于红外光谱的目标特征提取技术研究[D].成都:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2021.
- [13] 刘加庆,韩顺利,孟鑫,等.一种2~14 μm红外光谱辐射计的辐射定标方法[J].光学学报,2019,39(2):0212003.
- [14] 南童凌,沈宏海,杨名字,等.一种长波红外探测器的快速辐射定标方法[J].激光与光电子学进展,2017,54(12):122501.
- [15] 乔铁英,蔡立华,李宁,等.基于红外辐射特性系统实现对面目标测量[J].中国光学,2018,11(5):804-811.
- [16] 田棋杰,李周,常松涛,等.高温小目标红外辐射特性测量方法[J].光学学报,2017,37(10):1012004.
- [17] 胡子峰,王昭君,金路,等.非调制双色红外测温误差实时补偿方法研究[J].光学仪器,2020,42(3):15-20,56.

(编辑:李晓莉)