

# 光学学报

## 基于成像/光强变化响应的中/短波红外辐射校准系统设计

杨森, 张厚庆\*

东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

**摘要** 受到测量方法的限制, 现有的辐射校准系统只能在小-中型红外成像模拟器光学系统的透过率发生变化时实现辐射测量, 无法在大型红外成像模拟器的视场光阑发生变化时实现辐射测量。针对大型红外成像模拟器部分仿真状态无法评估的问题, 提出基于成像/光强变化响应的测量方法, 并设计新型红外辐射校准系统。系统研制完成后, 针对红外成像模拟器多辐射参数测量的需求, 提出多参数标定方法进行系统标定。系统的辐射照度为  $6 \times 10^{-10} \sim 7 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ , 工作波段为  $2.05 \sim 2.55 \mu\text{m}$  和  $3.70 \sim 4.80 \mu\text{m}$ , 测量不确定度为 1.88%。最后, 利用新系统校准大型红外成像模拟器在不同仿真状态下的输出辐射。校准结果表明, 新方法和新系统可以使大型红外成像模拟器在全仿真状态下实现多参数测量。

**关键词** 成像系统; 红外成像模拟器; 红外辐射校准系统; 成像/光强变化响应; 多参数标定

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0611001

## Design of Medium/Short Wave Infrared Radiation Calibration System Based on Imaging/Light Intensity Change Response

Yang Sen, Zhang Houqing\*

School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China

**Abstract** Due to the limitation of measurement methods, the existing radiation calibration system can only realize radiation measurement when the transmittance of the optical system of small-medium infrared imaging simulator changes, but not when the field-of-view aperture of large infrared imaging simulator changes. Aiming at the problem that part of the simulation state of the large-scale infrared imaging simulator cannot be evaluated, a measurement method based on imaging/light intensity change response is proposed, and a new infrared radiation calibration system is designed. After the development of the system is completed, a multi-parameter calibration method is proposed to meet the requirements of multi-radiation parameter measurement for infrared imaging simulator. The irradiance of the system is  $6 \times 10^{-10} \sim 7 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ , the working band is  $2.05 \sim 2.55 \mu\text{m}$  and  $3.70 \sim 4.80 \mu\text{m}$ , and the measurement uncertainty is 1.88%. Finally, the new system is used to calibrate the output radiation of a large-scale infrared imaging simulator under different simulation states. The calibration results show that the new method and new system can make the large-scale infrared imaging simulator realize multi-parameter measurement in full simulation state.

**Key words** imaging systems; infrared imaging simulator; infrared radiation calibration system; imaging/light intensity change response; multi-parameter calibration

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2021-09-07; 录用日期: 2021-09-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572019BF01)

通信作者: \*1695641968@qq.com

## 1 引言

红外制导导弹是一种广泛应用于空中目标打击的制导武器<sup>[1]</sup>,具有战略重要性,故需要定期对其进行可靠性测试以保证性能<sup>[2]</sup>。在可靠性测试中,不同类型的红外成像模拟器被广泛使用,通过目标源与多个干扰源的协调来实现半实物仿真<sup>[3]</sup>。

红外辐射校准系统是一种重要的红外成像模拟器输出辐射测量工具。李旭东等<sup>[4]</sup>和张建萍等<sup>[5]</sup>分别使用光谱辐射计和红外相机来校准红外成像模拟器的辐射亮度,要求被测源的辐射面覆盖校准系统的入瞳和视场。Carter 等<sup>[6]</sup>和 Kaplan 等<sup>[7]</sup>分别使用 BXR 型和 MDXR 型红外传输辐射计来校准红外成像模拟器的辐射亮度和辐射照度,校准不确定度分别为 3.5% 和 2.5%。王智平等<sup>[8]</sup>针对点目标与面目标的通用红外辐射特性测量模型,采用大面源黑体来定标测量系统的辐射亮度。然而,随着红外成像模拟器仿真指标的不断提高,其对辐射校准系统的校准能力和校准参数提出了新要求<sup>[9]</sup>。上述校准系统均采用基于光强变化响应的测量方法,故无法在大型成像模拟器的视场光阑发生变化时实现辐射校准。同时,上述校准系统均采用基于辐射亮度或辐射照度的标定方法,故无法实现等效黑体温度、辐射亮度和辐射照度的多参数测量。

为此,本文提出基于成像/光强变化响应的测量方法,该方法可以解决大型成像模拟器部分仿真状态无法评估的问题,提出的多参数标定方法可以解决红外成像模拟器的多参数测量问题。本文研制了新型红外辐射校准系统,测量波段为 2.05~2.55  $\mu\text{m}$  和 3.70~4.80  $\mu\text{m}$ ,辐射照度的测量范围为  $6 \times 10^{-10} \sim 7 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,测量不确定度优于 1.88%。

## 2 基于成像/光强变化响应的测量方法

根据仿真能力的不同,红外成像模拟器可分为小-中型和大型。以弹-目距离仿真为例,小-中型红外成像模拟器一般通过光学系统透过率的变化来实现近-中距的弹-目距离仿真,而大型红外成像模拟器在小-中型红外成像模拟器的基础上加入视场光阑,进而可实现远距的弹-目距离仿真。

针对小-中型红外成像模拟器的辐射校准,采用基于光强变化响应的测量方法即可满足测量需求,与之对应的基于光强变化响应的辐射测量体系如图 1 所示。针对大型红外成像模拟器的辐射校准,测量需求扩展为可以在光学系统的透过率和视场光

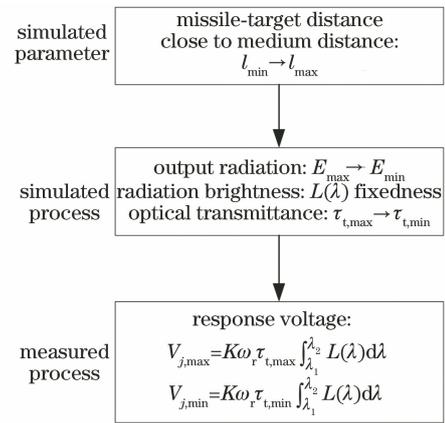


图 1 基于光强变化响应的辐射测量体系

Fig. 1 Radiation measurement system based on light intensity change response

阑同时发生变化时实现辐射测量。然而,受到现有测量方法原理的限制,大型红外成像模拟器在视场光阑发生变化时仿真性能无法评估。针对上述问题,本文提出基于成像/光强变化响应的测量方法。此时,系统视场角  $\omega_r$  大于模拟器视场角  $\omega_t$ ,模拟器在探测器上的成像光斑尺寸小于探测面尺寸。当模拟器的视场光阑发生变化且透过率  $\tau_t$  和辐射亮度  $L(\lambda)$  不变时,系统响应  $V$  随  $\omega_t$  的变化可表示为

$$\begin{cases} V_{\min} = K\omega_{t,\min}\tau_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda \\ V_{\max} = K\omega_r\tau_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为测量波段的下限和上限; $K$  为化简后的测量常数。

基于新方法构建的辐射测量体系如图 2 所示。由图 2 可知,新方法不仅可以响应  $\tau_t$  或  $L(\lambda)$  所引起的辐射变化,也可以响应  $\omega_t$  所引起的辐射变化。也就是说,采用该方法不仅可以在模拟器的透过率发生变化时实现辐射测量,而且可以在模拟器的视场光阑发生变化时实现辐射测量,进而实现大型红外成像模拟器在全仿真状态下的性能评估。

## 3 系统设计

### 3.1 总体设计

系统通过主物镜组来实现准直辐射的会聚,采用调制盘来降低背景辐射的干扰。为了满足信噪比和测量下限,采用高探测率的 InSb 探测器。为了满足测量上限,采用中继透镜组和衰减片组来实现内部辐射的衰减。为了满足分辨率,采用放大倍数控制器。系统的技术指标如表 1 所示。

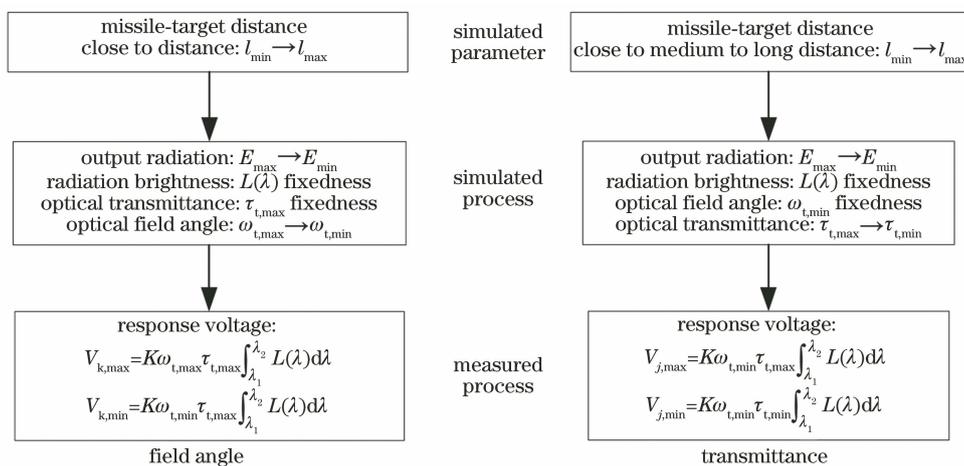


图 2 基于成像/光强变化响应的辐射测量体系

Fig. 2 Radiation measurement system based on imaging/light intensity change response

表 1 系统的技术指标

Table 1 Technical index of system

Index	Value
Measurement uncertainty / %	≤ 3
Waveband / μm	2.05–2.55, 3.70–4.80
Irradiance / (W·cm <sup>-2</sup> )	6 × 10 <sup>-10</sup> – 7 × 10 <sup>-4</sup>
Field angle / (°)	± 0.6
Signal to noise ratio	≥ 100

### 3.2 系统组成

辐射校准系统由光学系统、探测系统和电路系统组成。光学系统包括主物镜组、调制盘、中继透镜组和滤光片/衰减片组；探测系统包含探测器和液氮制冷系统；电路系统包括光电调制器、电机控制器、驱动电路、前置放大器、量程转换器、锁相放大器和数据采集器。系统的原理框图如图 3 所示。

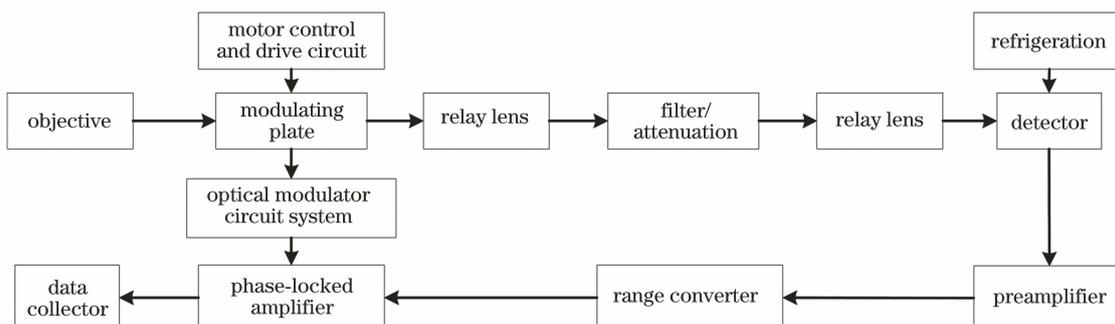


图 3 系统的原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of system

光学系统采用透射式结构，入瞳尺寸为 70 mm，焦距为 140 mm。采用调制技术配合锁相放大技术来抑制信号漂移和背景噪声，这可以保证系统的检测精度<sup>[10]</sup>。镀金反射膜的调制盘放置于主物镜组的焦平面，聚焦光束经由调制盘发散，再经由中继透镜组形成平行光区来实现光束的滤光和衰减。选用 InSb 探测器，其探测面的直径为 3 mm，响应波段为 1.0~5.5 μm。探测器输出的正弦信号经由低噪声前置放大器放大 10<sup>6</sup> 倍后，与光电调制器的方波信号同步进入锁相放大器。锁相放大器输出的直流信号进入数据采集器，通过 USB 接口与上位机通信。

系统通过衰减片组和量程切换电路来协调测量

范围和信噪比。衰减片组的可调衰减倍数为 1~10<sup>4</sup> 倍，将以往的辐射-电压二者对应改变为辐射-衰减片-电压三者对应，这可以兼容大信噪比、宽量程和线性区间。量程切换电路控制系统具有检测弱光和强光的能力：弱光条件下将衰减片组切换至 20× 的放大倍数，可以保证仪器在 10<sup>-10</sup> W/cm<sup>2</sup> 能量级时依然具有较高的信噪比；强光条件下将衰减片组切换至 2× 的放大倍数，可以保证在 10<sup>-4</sup> W/cm<sup>2</sup> 能量级时系统工作在线性区间。

### 4 多参数标定方法

采用标准黑体与平行光管所组成的标准直辐

射源。黑体的发射率为 0.99, 温度范围为 5~1000 °C, 温度精度为 ±0.5 °C, 可选光阑尺寸为 0.1~10.0 mm。平行光管采用反射式结构, 出瞳尺寸为 200 mm, 焦距为 650 mm。系统的标定图如图 4 所示。

采用新测量方法进行测量, 一方面要求准直辐射源的像完全落在探测器的探测面上, 另一方面要求最大程度消除因探测器光敏面不均匀对系统测量的不利影响。因此, 在标定调节中遵循“大孔调节, 小孔测量”的原则以保证标定重复性。多参数标定

方法的流程如图 5 所示。



图 4 系统的标定图

Fig. 4 Calibration diagram of system

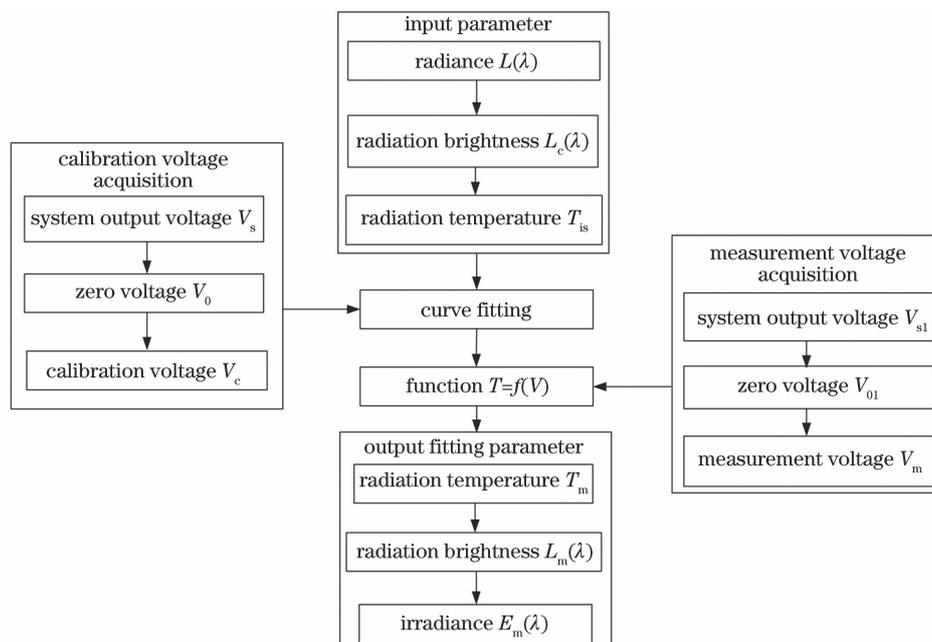


图 5 多参数标定方法的流程

Fig. 5 Process of multi-parameter calibration method

标定过程中, 黑体的温度由一级计量标准的精密热电偶实时校准。选用实心光阑孔进行零点电压  $V_0$  的测量。采用多项式拟合得到拟合函数。直径为 2 mm 光阑和 20×放大倍数下的标定曲线如图 6 所示, 其中短波分为 0~2 个衰减片的三种情况, 中

波分为 1~3 个衰减片的三种情况, 测量波段为 2.05~2.55  $\mu\text{m}$  和 3.70~4.80  $\mu\text{m}$ , 图注的三个数字中前两个代表波段, “1-3”指波段为 2.05~2.55  $\mu\text{m}$ , “3-5”指波段为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ , 最后一个指采用的衰减片个数。

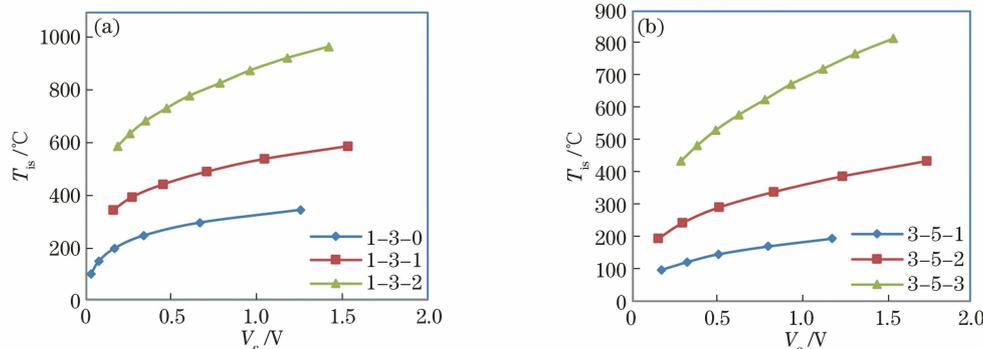


图 6 标定曲线。(a) 2.05~2.55  $\mu\text{m}$ ; (b) 3.70~4.80  $\mu\text{m}$

Fig. 6 Calibration curve. (a) 2.05~2.55  $\mu\text{m}$ ; (b) 3.70~4.80  $\mu\text{m}$

## 5 不确定度分析

新型红外辐射校准系统的测量误差来源主要包括标准黑体的温度、发射率、光阑孔径,平行光管的焦距和透过率,以及系统的电压测量精度和标定重复性。系统各分量的不确定度分析如表 2 所示,合成标准不确定度为 1.88%。

表 2 系统各分量的不确定度  
Table 2 Uncertainty of each component of system

Component	Relative standard uncertainty /%
Temperature of blackbody	1.00
Emissivity of blackbody	0.30
Aperture of blackbody	1.00
Transmittance of collimator	0.42
Voltage measurement accuracy of system	0.74
Calibration reproducibility of system	0.85
Combined standard uncertainty	1.88

黑体的温度由一级计量标准的热电偶测量,测量精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。出瞳孔径由 V-12 型精密轮廓投影仪测量,测量精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。平行光管由一级计量站校准,由于其出瞳口径大于测量系统的入瞳口径,所以忽略平行光管的焦距不确定度,仅考虑透过率不确定度。系统的电压测量精度仅考虑相同状态下的电压波动。标定重复性采用重复测试的方法获取。

## 6 大型红外成像模拟器的辐射校准实验

使用新型辐射校准系统来校准大型红外成像模拟器的输出辐射,采用多次测量取平均值的方法进行全仿真状态的评估和多参数的测量。待测大型红外成像模拟器中目标光路的光源为电阻阵列,干扰光路的光源为不同功率的高压氙灯 A、B 和 C 以及黑体 D。校准实验中模拟器的参数设置如表 3 所示。

首先开展视场光阑发生变化的辐射照度测量实验,设置目标通道中的电阻阵列作为辐射源并单独工作,此时辐射照度的测量结果如表 4 所示。由表 4 可知,模拟器的输出辐射随模拟器视场光阑面积的增大而增大,辐射照度的测量范围为 $6\times 10^{-10}\sim 7\times 10^{-4}\text{ W/cm}^2$ 。采用现有的辐射校准系统是无法

响应上述变化的,此实验证明了采用本文研制的新型辐射校准系统可以响应模拟器在此仿真状态下的输出辐射变化,相比于现有系统实现了测量功能的扩展。

表 3 模拟器的参数设置

Table 3 Parameter setting of simulator

Radiation source	Parameter	Value
Resistor array	Gray scale	256
	Waveband / $\mu\text{m}$	3.70–4.80
Blackbody	Temperature range / $^{\circ}\text{C}$	1000–1200
	Temperature interval / $^{\circ}\text{C}$	50
	Field stop area / $\text{mm}^2$	0.146
	Waveband / $\mu\text{m}$	2.05–2.55

表 4 辐射照度的测量结果

Table 4 Measurement result of irradiance

Field stop area / $\text{mm}^2$	Irradiance /( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
0.031	$6.105\times 10^{-9}$
0.196	$3.934\times 10^{-8}$
0.786	$1.589\times 10^{-7}$
1.540	$3.169\times 10^{-7}$
3.142	$6.454\times 10^{-7}$

其次开展辐射亮度发生变化的等效黑体温度测量实验。设置 D 路干扰通道中的黑体作为辐射源并单独工作,此时等效黑体的温度测量结果如表 5 所示。由表 5 可知,新型和现有的红外辐射校准系统在等效黑体温度方面的测量结果接近,偏差范围为 $2.1\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此实验证明了在模拟器的仿真状态下新型和现有的红外辐射校准系统可以取得接近的测量结果。

表 5 等效黑体的温度测量结果

Table 5 Temperature measurement result of equivalent blackbody

Temperature of blackbody / $^{\circ}\text{C}$	Temperature of equivalent blackbody / $^{\circ}\text{C}$	
	Measured by existing radiometer	Measured by new radiometer
1000	410.0	407.8
1050	424.6	422.2
1100	438.4	436.3
1150	452.1	449.6
1200	465.0	462.6

最后开展光学系统透过率发生变化的能量比测

量实验,设置目标通道中的电阻阵列和 A、B、C 路干扰通道中的高压氙灯作为辐射源并共同工作,此时能量比的测量结果如表 6 所示,其中能量比的测量结果根据辐射亮度的测量值计算所得。将表 6 中的数据与模拟器的技术指标进行对比,可以看到被测红外成像模拟器满足技术指标中的参数要求。

表 6 能量比的测量结果

Table 6 Measurement result of energy ratio

Measured object	Waveband	Energy ratio
Interference A	Medium/short wave	1:3.91
Interference B	Medium/short wave	1:4.02
Interference C	Medium/short wave	1:3.91
Object/interference A	Medium wave	1:3.83
Object/interference B	Medium wave	1:4.35
Object/interference C	Medium wave	1:5.41

## 7 结 论

本文研制的新型红外辐射校准系统作为一种量值传递体系,测量波段为  $2.05\sim 2.55\ \mu\text{m}$  和  $3.70\sim 4.80\ \mu\text{m}$ ,辐射照度的测量范围为  $6\times 10^{-10}\sim 7\times 10^{-4}\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,合成标准不确定度为 1.88%。区别于现有的校准系统,新系统基于成像/光强变化响应的测量方法进行搭建,采用多参数标定方法进行标定。大型红外成像模拟器的输出辐射校准实验结果表明,新系统可以使大型红外成像模拟器在全仿真状态下实现多参数测量,为大型红外成像模拟器的仿真性能评估提供了有效手段。

## 参 考 文 献

- [1] Li F W, Zhao H X, Pan G Q, et al. Study on characteristics of high-strength nano infrared ceramic dome for mid-infrared missile [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0716002.  
李福巍, 赵虹霞, 潘国庆, 等. 中波红外导弹用高强纳米红外陶瓷整流罩特性研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0716002.
- [2] Yang S, Zhang H Q. Radiometric calibration method of large military infrared imaging simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2411003.  
杨森, 张厚庆. 大型军用红外成像模拟器辐射校准方

法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2411003.

- [3] Zhang S C, Li Z, Gao Y Z, et al. Design of optical system for infrared scene projection in cryogenic environment[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422003.  
张思晨, 李卓, 高彦泽, 等. 低冷环境红外场景投影光学系统的设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422003.
- [4] Li X D, Feng A G, Zhou X N, et al. Radiation characteristics of IR target simulator used in field[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 252-255.  
李旭东, 冯爱国, 周新妮, 等. 外场用红外目标模拟器辐射特性测量研究[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 252-255.
- [5] Zhang J P, Yang C Y. Research on the radiation calibration method of infrared target simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2045-2050.  
张建萍, 杨词银. 红外目标模拟器辐射校准方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2045-2050.
- [6] Carter A C, Datla R U, Jung T M. Calibration of low-background temperature IR test chambers used to calibrate space sensors[J]. Metrologia, 2009, 46(4): S213-S218.
- [7] Kaplan S G, Woods S I, Carter A C, et al. Calibration of IR test chambers with the missile defense transfer radiometer[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8707: 870709.
- [8] Wang Z P, Wu T B, Li Z, et al. A general technology of infrared radiation characteristics measurement[J]. Infrared, 2020, 41(8): 29-35.  
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.
- [9] Sun M K. Research on small dynamic target generation control technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 1-2.  
孙铭坤. 小型动态目标生成控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 1-2.
- [10] Wang Y Y, Qiao Y L, Li Y Y, et al. Research on passive infrared signal processing method based on lock-in amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0712001.  
王云云, 乔延利, 李杨裕, 等. 基于锁相放大的被动红外信号处理方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0712001.