

MOS 电阻阵下红外诱饵模拟仿真

宋敏敏¹, 唐善军², 王碧云¹, 吕 弢¹, 付晓海³

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109;
3. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 为了能达到验证红外制导导弹对抗红外诱饵性能的目的, 需要在半实物仿真过程中逼真地模拟红外诱饵在实际红外对抗场景中的能量变化和运动形式, 即红外诱饵被投放后辐射变化以及其与目标的分离形式, 为此利用 MOS 电阻阵进行红外诱饵模拟仿真研究。现有国产 MOS 电阻阵不小于 200 Hz 的刷新频率, 不小于 300 °C 的等效黑体温度能很好地复现红外诱饵燃烧时剧烈的能量变化, 同时通过红外诱饵建模理论建立基础仿真运动模型, 并且基于外场采集数据对所建立的红外诱饵运动模型进行修正, 主要是对红外诱饵运动轨迹进行修正。最后, 采用 MOS 电阻阵动态红外场景渲染和驱动软件完成红外诱饵的模拟。

关键词: MOS 电阻阵; 半实物仿真; 红外诱饵; 运动模型

中图分类号: TN 215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0504002

Infrared decoy simulation based on MOS resistance array

Song Minmin¹, Tang Shanjun², Wang Biyun¹, Lv Tao¹, Fu Xiaohai³

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China; 2. Shanghai Electro-mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 3. Shanghai Aerospace Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to verify the performance of infrared guidance missile against infrared decoy, it is necessary to simulate the energy change and motion form of infrared decoy in the actual IR scene in the process of hardware in the loop simulation, that is the variation of the radiation of the infrared decoy and separation of bait with target after the interference was delivered. For this reason, the infrared decoy simulation was studied by using MOS resistor array. Existing domestic MOS resistor array is not less than 200 Hz refresh frequency, and equivalent blackbody temperature of not less than 300 °C can reproduce well the energy of infrared decoy changing when it is burning, at the same time, the simulation model was established based on the infrared decoy modeling theory, and the infrared decoy motion model was modified based on the collected data in the field, it is mainly infrared decoy trajectory correction. Finally, the simulation of infrared decoy was realized based on MOS dynamic infrared scene rendering and driving software.

Key words: MOS resistor arrays; hardware-in-the-loop simulation; infrared decoy; motion model

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(613271010204)

作者简介: 宋敏敏(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外探测与半实物仿真方面的研究。Email: 346308433@qq.com

0 引言

为了有效地提高红外制导导弹对抗红外诱饵的能力,验证导弹抗红外诱饵算法^[1-3]的正确性和有效性,需要进行大量的半实物仿真验证^[4-6]。在半实物仿真过程中,红外诱饵辐射特性与运动特性的真实模拟对验证导弹抗红外诱饵性能起关键性的作用,因此要建立红外诱饵模型,逼真的模拟目标机不同飞行时刻、不同飞行姿态等红外诱饵初始投放状态对红外诱饵运动方式以及辐射的影响,充分考虑不同经纬度、不同飞行高度、不同大气环境^[7-9]、不同重力环境等等因素,增加其与实际红外对抗场景的符合程度,提高仿真验证结果的可信度^[4]。目前国内外相关机构对红外诱饵的逼真仿真开展了大量工作,但是因其技术的敏感性,国外相关论文只是对验证抗红外诱饵算法提出具体要求,但是如何实现验证的试验方法基本没有报道。

文中主要研究基于 MOS 电阻阵实现红外诱饵模拟技术,MOS 电阻阵是一种较为接近真实物理环境辐射特性的模拟器,它温度范围宽、动态响应特性好、对比度和温差性能指标都很高,所以模拟红外诱饵的红外辐射特性和运动特性具有很大的优势。目前美国军方半实物仿真所用 MOS 电阻阵分辨率已经达到 1 024×1 024、1 536×768,温度分辨率不大于 0.02℃,帧频最高达到 400 Hz,中波红外可模拟等效温度为-123~477℃,长波红外可模拟等效温度为-123~327℃,同时美国 SBIR 公司在 2012 年起开始研发超高温电阻阵列,最高中波红外等效温度将达到 1 727℃。国内已经有 256×256 高帧频电阻阵列的成熟产品,电阻阵器件占空比约 15%,采用 MEMS 半导体材料制造工艺,是 MOS 电阻阵国产化第二代技术,同时国内 512×512 高帧频电阻阵列已经完成研制,正向工程化应用发展。

随着真实红外对抗环境越发地恶劣,越来越要求红外半实物仿真场景的逼真度和实时性,文中主要研究通过 MOS 电阻阵实现红外诱饵模拟技术,基于 MOS 电阻阵高帧频,毫秒级快速响应等特点^[9-10]能实时地复现红外诱饵投射后剧烈的辐射变化,同时结合实际采集红外诱饵数据对红外诱饵运动模型进行修正,主要加入大气传输衰减影响,对红外诱饵理论模型中的诱饵投放后所受重力、阻力以及诱饵投放姿态、速度等相关参量进行修正。最后,利用 MOS

电阻阵实现红外诱饵辐射、尺寸以及运动轨迹的模拟,实时生成目标投放红外诱饵仿真图像。

1 红外诱饵辐射模型

1.1 MOS 电阻阵模拟系统

如图 1 所示,MOS 电阻阵^[11-12]模拟系统主要由红外外场生成计算机、MOS 电阻阵器件、驱动控制系统和工作环境控制系统组成。基于 MOS 电阻阵模拟硬件,通过实时计算机生成红外光电动态对抗场景,模拟复杂背景下典型目标投放红外诱饵情况,为红外制导武器抗红外诱饵性能半实物仿真^[13]验证提供与真实作战环境相似的红外目标、红外诱饵与背景,即在试验室内就能完成红外制导导弹抗红外诱饵性能的测试、仿真和评估,大大降低了武器的研制成本,缩短了研制周期。

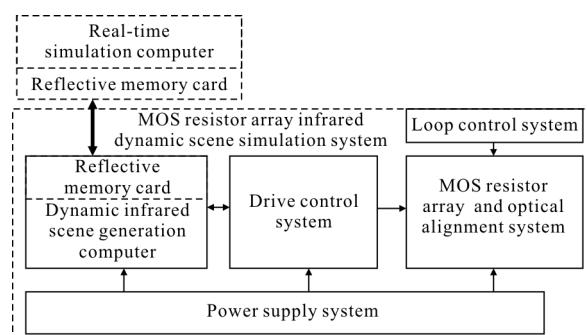
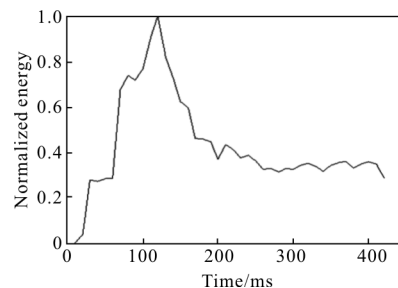


图 1 MOS 电阻阵动态红外外场景模拟系统

Fig.1 MOS resistor array dynamic infrared scene simulation system

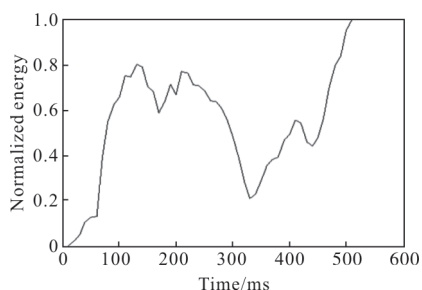
1.2 红外诱饵辐射模拟

外场实验中通过吊舱对红外诱饵辐射进行采集与分析,大量数据统计后可知红外诱饵燃烧周期为 3~5 s 左右,一般 0.1~0.5 s 后辐射达到峰值,燃烧周期内辐射能量起伏很大,图 2 为某两种红外诱饵投放后能量变化统计结果。



(a) 空基某型号红外诱饵能量变化

(a) Energy variation of infrared decoy by air launching



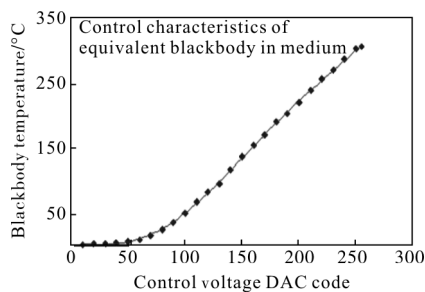
(b) 地基某型号红外诱饵能量变化

(b) Energy variation of infrared decoy by ground launching

图 2 红外诱饵归一化能量变化

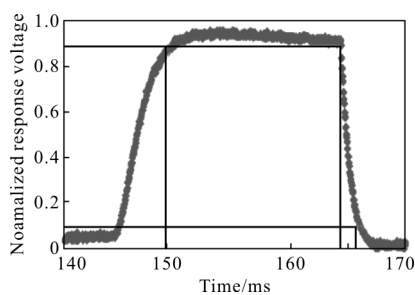
Fig.2 Normalized energy change of infrared decoy

由图 2 可知, 现有红外诱饵红外辐射因为起燃环境的原因, 主要可以归纳为爆燃后稳定辐射模型以及具备两次起燃情况的辐射模型, 因此为了准确模拟红外诱饵红外辐射状态, 需要目标模拟器具备模拟温度范围大、动态响应快等能力, 而 MOS 电阻阵列就具备这样的特点, 图 3 是国产某型号电阻阵列器件在中波红外波段测试得到的等效黑体温度控制特性与辐射动态响应特性。



(a) 中波温度控制特性

(a) Temperature control characteristic in medium-wave infrared



(b) 辐射动态响应特性

(b) Dynamic response characteristics of radiation

图 3 电阻阵列器件中波温度控制特性及动态响应特性

Fig.3 Temperature control characteristics and dynamic

response characteristics of resistance array wave

由图 3 可知, 中波最高等效黑体温度可达到 300℃ 以上, 辐射上升时间 3.8ms, 辐射下降时间 1.6、0ms, 保持时间内的辐射输出下降不到 3.06%。即 MOS 电阻阵列响应帧频高达 200Hz, 同时温度分辨率不大于 0.2℃, 能准确模拟如红外诱饵辐射剧烈的能量变化, 包括红外诱饵爆燃和二次起燃等辐射状态, 并且现有国产 MOS 电阻阵列可以达到 300℃ 以上的等效温度, 可以模拟红外诱饵峰值状态下的辐射情况, 能完成高压比 (红外诱饵与载机辐射比值) 红外诱饵能量仿真模拟。

2 红外诱饵运动模拟

红外诱饵的运动主要由初始时刻投放速度、所受重力、阻力及升力等参量决定, 同时初始时刻投放速度因为惯性的缘故需要考虑实际投放载体的运动, 即在仿真模拟过程中考虑实时仿真弹道的影响。通过对决定红外诱饵运动的各个参量进行量化, 包括投放速度、重力、阻力系数等等, 实时计算红外诱饵在大地坐标下的位置 (x_D, y_D, z_D) 以及速度 $(v_{x_D}, v_{y_D}, v_{z_D})$, 最后进行导弹视线下的坐标转换, 体现的仿真效果是在弹体视线系下的红外诱饵运动过程。

2.1 红外诱饵与目标分离分析

为了能逼真地模拟红外诱饵在实战环境下的运动形式, 需要分析在导弹视线下红外诱饵与目标的分离角度, 评价红外诱饵在导弹视场中与目标的不同粘连程度对红外导弹对抗红外诱饵能力的影响, 即半实物仿真能达到复现真实红外对抗场景^[10]的能力, 完成红外制导导弹在目标投放红外诱饵情况下, 目标识别算法的验证和优化, 提高红外制导导弹对抗红外诱饵的能力。

在 MOS 电阻阵列模拟过程中, 根据导弹的位置 (x_m, y_m, z_m) 、目标的位置 (x_T, y_T, z_T) 和红外诱饵的位置 (x_D, y_D, z_D) 可以实时计算导弹视线下红外诱饵与目标的分离角度^[7], 计算过程如下:

导弹与目标在惯性坐标系下的相对位置和导弹与红外诱饵在惯性坐标系下的相对位置如下式:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{mT} \\ \Delta y_{mT} \\ \Delta z_{mT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T - x_m \\ y_T - y_m \\ z_T - z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{mD} \\ \Delta y_{mD} \\ \Delta z_{mD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_D - x_m \\ y_D - y_m \\ z_D - z_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

惯性坐标系到弹体坐标系的转换矩阵为:

$$L(\gamma, \vartheta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \varphi \sin \vartheta & -\cos \vartheta \sin \varphi \\ -\sin \vartheta \cos \varphi \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \sin \vartheta \sin \varphi \cos \gamma + \cos \varphi \sin \gamma \\ \sin \vartheta \cos \varphi \sin \gamma + \sin \varphi \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & -\sin \vartheta \sin \varphi \sin \gamma + \cos \varphi \cos \gamma \end{bmatrix}$$

因此，导弹与目标在弹体坐标系下的相对位置和导弹与红外诱饵在弹体坐标系下的相对位置分别为：

$$\begin{bmatrix} \Delta x'_{mT} \\ \Delta y'_{mT} \\ \Delta z'_{mT} \end{bmatrix} = L(\gamma, \vartheta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{mT} \\ \Delta y_{mT} \\ \Delta z_{mT} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x'_{mD} \\ \Delta y'_{mD} \\ \Delta z'_{mD} \end{bmatrix} = L(\gamma, \vartheta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_{mD} \\ \Delta y_{mD} \\ \Delta z_{mD} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可计算红外诱饵与目标的分离角度 δ 为：

$$\delta = \arccos \left(\frac{\Delta x'_{mT} \Delta x'_{mD} + \Delta y'_{mT} \Delta y'_{mD} + \Delta z'_{mT} \Delta z'_{mD}}{\sqrt{\Delta x'^2_{mT} + \Delta y'^2_{mT} + \Delta z'^2_{mT}} \sqrt{\Delta x'^2_{mD} + \Delta y'^2_{mD} + \Delta z'^2_{mD}}} \right) \quad (5)$$

式中： γ 、 ϑ 、 φ 为导弹的姿态角。

2.2 红外诱饵运动在电阻阵中的模拟实现

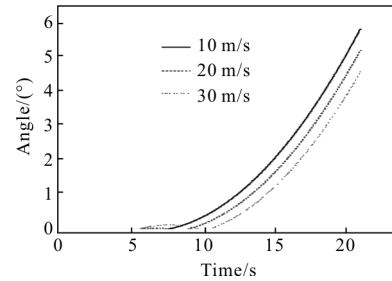
基于上述理论基础，将红外诱饵弹的运动数学模型编写成软件模块嵌入到 MOS 电阻阵动态红外场景渲染及驱动软件中，实现红外诱饵弹投放后运动轨迹的模拟，同时通过外场实际红外诱饵数据采集，对所建立的红外诱饵模型进行标定修正。

2.2.1 红外诱饵投放后与目标分离程度分析

在红外诱饵投放后，不同红外诱饵运动参数直接影响红外诱饵和目标的分离方向以及程度，即红外诱饵运动轨迹。尤其是红外诱饵初始投放速度和红外诱饵阻力系数直接关系不同时刻红外诱饵和目标的粘连程度，具体通过不同时刻红外诱饵和目标的分离角表征。

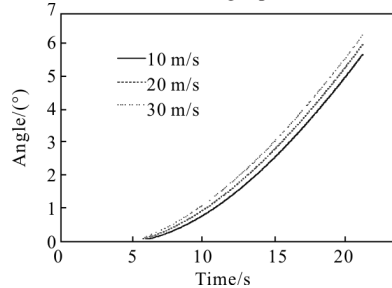
具体计算弹道为高差 1 000 m，航捷-500 m，导弹发射距离为 12 km，导弹和目标迎头 180°飞行，速度都为 270 m/s，红外诱饵投放时间为发射后 5 s，红外诱饵阻力系数 1，投放速度分别为 10、20、30 m/s 时，红外诱饵向上和向下投放时与目标的分离角，如图 4(a)和图 4(b)所示。

计算弹道为高差 1 000 m，航捷-500 m，导弹发射距离为 12 km，导弹和目标迎头 180°飞行，速度都为 270 m/s，红外诱饵投放时间为发射后 5 s，红外诱饵投放速度为 20 m/s，阻力系数分别为 0.25、0.5、1 时，红外诱饵向上和向下投放时与目标的分离角，分别如图 5(a)和图 5(b)所示。



(a) 向上投放

(a) Launching upward

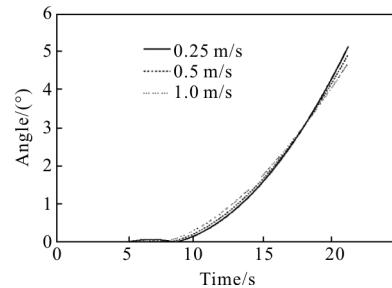


(b) 向下投放

(b) Launching downward

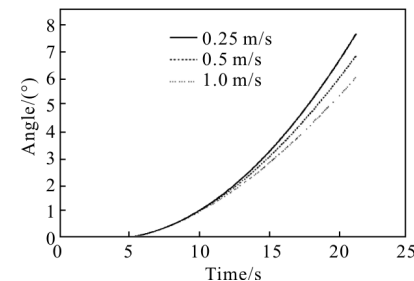
图 4 不同初始投放速度

Fig.4 Different initial launching speeds



(a) 向上投放

(a) Launching upward



(b) 向下投放

(b) Launching downward

图 5 不同阻力系数

Fig.5 Different drag coefficients

载机不同投放速度以及红外诱饵在不同投放环境中所受到的阻力等等对红外诱饵与目标的粘连程度有巨大影响,如图 4 所示,向上投放和向下投放时,载机投放速度越大,红外诱饵与目标分离越快;如图 5 所示,向上投放和向下投放时,阻力系数越小,红外诱饵与目标分离越慢。而这关系到红外导弹面对的抗红外诱饵成功概率,一般情况下红外诱饵与目标分离越慢,抗干扰失败概率越大。

为了能有效地验证和提高红外制导导弹的抗干扰能力,需要将真实的红外对抗场景复现出来,不仅包括红外诱饵辐射变化的复杂性,同时体现红外诱饵运动的逼真程度,将 MOS 电阻阵红外半实物仿真的优势发挥出来,所以对建立的红外诱饵运动模型进行标定修正。

2.2.2 红外诱饵运动模型修正

通过 2.2.1 不同红外诱饵运动模型参数对诱饵轨迹影响分析,结合实际飞行弹道下吊舱采集得到的红外诱饵运动数据,对红外诱饵运动模型进行修正。

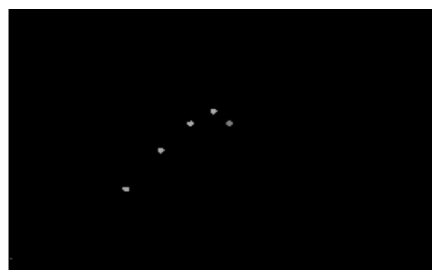
实际飞行弹道如上,即高差 1000m,航捷-500m,载机设置干扰投放速度为 20m/s,分别进行单发向上和向下红外诱饵投放采集试验,根据试验数据对 MOS 电阻阵红外诱饵运动模型进行标定,确定不同投放地点、高度下重力加速度、阻力系数等相关参数对红外诱饵运动轨迹的影响,标定载机实际投放诱饵速度和仿真状态下诱饵投放速度相同情况下诱饵运动轨迹的一致性,标定结果如图 6 所示。

标定后确定,向上投放阻力系数一般取值 0.25,而向下投放阻力系数取值为 1,其他包括经纬度、飞行高度、大气环境以及重力环境等根据飞行弹道实时修正,相关环境参数代入如 2.1 节所示的理论模型。如图 6 所示,实际采集数据与修正后 MOS 电阻阵红外诱饵仿真数据对比,基于红外诱饵运动理论



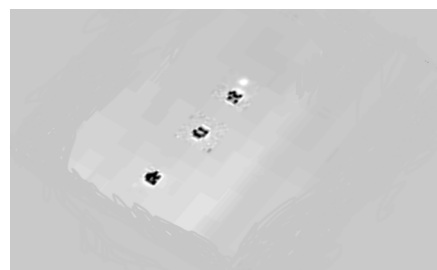
(a) 实际采集红外诱饵向上投放情况

(a) Infrared decoy launching upward by actual collecting



(b) MOS 电阻阵仿真红外诱饵向上投放情况

(b) Infrared decoy launching upward by simulation of MOS resistor arrays



(c) 实际采集红外诱饵向下投放情况

(c) Infrared decoy launching downward by actual collecting



(d) MOS 电阻阵仿真红外诱饵向下投放情况

(d) Infrared decoy launching downward by simulation of MOS resistor arrays

图 6 红外诱饵运动实际采集与仿真生成对比

Fig.6 Comparison of actual acquisition and simulation of infrared decoy motion

模型,结合实际采集得到的红外诱饵运动数据,对影响红外诱饵运动轨迹的各个参数进行标定,确保半实物仿真中红外诱饵运动轨迹与真实红外对抗场景中红外诱饵运动轨迹的一致性。

3 结论

文中介绍了 MOS 电阻阵下红外诱饵的模拟仿真,分析了 MOS 电阻阵模拟仿真红外诱饵辐射与运动状态的优势。MOS 电阻阵的高刷新帧频,高等效温度以及稳定的辐射输出,能逼真复现真实对抗场景中红外诱饵的能量变化的复杂性,同时通过外

场数据采集分析,不仅能还原红外诱饵辐射能量随时间的变化情况,同时能对所建立的红外诱饵理论运动模型进行标定修正,满足红外导弹对红外半实物仿真生成场景真实性要求,不用进行外场实验就能完成红外制导导弹抗红外诱饵性能的测试、仿真和评估。

最后,随着 MOS 电阻阵器件技术的发展,尤其是分辨率,即电阻阵器件微阵列数的增加,MOS 电阻阵不仅能复现红外诱饵对抗场景,同时能复现复杂背景下的红外导弹面对的战场环境,完成红外制导导弹在复杂环境下抗干扰性能验证,减少研制周期和成本。

参考文献:

- [1] Yang Songqi, Wang Bingjian, Yi Xiang, et al. Infrared decoys recognition method based on dual-band information fusion [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 542-546.
- [2] Bai Kun, Wang Yuehuan, Yan Yi, et al. Infrared small target tracking based on target and interference behaviors model [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 256-265.
- [3] Chunling Y, Yu C, Mengda Y. Research on infrared decoy movement characteristics and simulation [C]//7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2012: 1892-1895.
- [4] Zhang Zuoyu, Liao Shouyi, Zhang Jincheng, et al. Real-time battlefield smoke IR simulation based on physical model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0404004. (in Chinese)
张作宇, 廖守亿, 张金城, 等. 基于物理模型的战场烟幕实时红外仿真[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0404004.
- [5] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Fan Xiaoguang, et al. Research of an effectiveness evaluation method of infrared countermeasure process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)
李建勋, 童中翔, 樊晓光, 等. 红外对抗过程的效能评估方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)
- [6] Dong Minzhuo, Wang Jianhua, Sun Li, et al. IR target simulation and generation system based on MOS resistor array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 411-415. (in Chinese)
- 董敏周, 王建华, 孙力, 等. 基于 MOS 电阻阵的红外目标模拟生成系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 411-415.
- [7] Guo Lihong, Guo Hanzhou, Yang Ciyin, et al. Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1871-1877. (in Chinese)
郭立红, 郭汉洲, 杨词银, 等. 利用大气修正因子提高目标红外辐射特性测量精度 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1871-1877.
- [8] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1548-1557. (in Chinese)
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1548-1557.
- [9] Chen Shiwei, Yang Xiaogang, Zhang Shengxiu, et al. Single infrared stripe nonuniformity correction algorithm based on adaptive diffusion models [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 106-113. (in Chinese)
陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于自适应扩散模型的单帧红外条纹非均匀性校正算法 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 106-113.
- [10] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Wang Jian, et al. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 150-155. (in Chinese)
张晓龙, 刘英, 王健, 等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 150-155.
- [11] Zhao Xishuai, Wu Genshui, Zhao Songqing, et al. Target image generation technology in the infrared imaging guidance hardware-in-the-Loop simulation[J]. *Measurement and Control Technology*, 2013, 32(7): 153-156. (in Chinese)
赵西帅, 吴根水, 赵松庆, 等. 红外成像制导半实物仿真目标图像生成技术[J]. *测控技术*, 2013, 32(7): 153-156.
- [12] Zhang Kai, Huang Yong, Sun Li, et al. Non-uniformity characterization and correction of MOS resistor array [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(1): 108-112. (in Chinese)
张凯, 黄勇, 孙力, 等. MOS 电阻阵的非均匀性测量及补偿方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(1): 108-112.
- [13] Stockbridge R G, Goldsmith G C. Characterization and nonuniformity correction of a resistor array infrared scene projector [C]//SPIE Proceedings, 1994, 2223: 51-62.