

文章编号: 1672-8785(2015)06-0013-04

红外仿真中像面最大温差的计算方法

王治乐 徐 君 钱育龙

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江哈尔滨 150010)

摘 要: 针对红外仿真系统中杂散辐射会影响模拟像面温度均匀性的问题, 提出了像面温度偏差这一概念, 并给出了像面最大温度偏差值的计算方法。建立了用于计算像面最大温差的红外仿真系统简化模型。定义了能反映像面温度变化的局部辐照度偏差系数。推导了局部辐照度偏差系数与像面最大温差的表达式, 给出了红外仿真系统像面最大温差的一般计算步骤。通过实际算例演示了该计算方法, 并设计了验证实验。结果表明, 测试得到的像面最大温差均在理论计算数值范围内, 从而验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 红外仿真; 像面最大温差; 计算方法; 杂散辐射

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.06.003

A Calculation Method for Maximum Temperature Difference of Image Plane in Infrared Simulation System

WANG Zhi-le, XU Jun, QIAN Yu-long

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150010, China)

Abstract: Aiming at the problem that the stray radiation in an infrared simulation system may affect the temperature uniformity on the simulated image plane, a conception of temperature difference on an image plane is proposed and a method for calculating the maximum temperature difference on an image plane is given. A simplified infrared simulation system model for calculating the maximum temperature difference on an image plane is established. A partial irradiance deviation factor which can reveal the change of temperature on the image plane is defined. The expression for the above factor and maximum temperature difference on an image plane is deduced. The common steps for calculating the maximum temperature difference on an image plane is also given. The calculation method is demonstrated in a practical infrared simulation system and is verified in an experiment. The results show that the measured temperature differences are all within the theoretical numerical range. So, the correctness and effectiveness of the method are verified.

Key words: infrared simulation; maximum temperature difference on image plane; calculating method; stray radiation

收稿日期: 2015-05-08

基金项目: 航空科学基金项目 (20130177004)

作者简介: 王治乐 (1975-), 男, 河南偃师人, 教授, 主要从事红外景象仿真研究。

E-mail: wangzhile@hit.edu.cn

0 引言

红外仿真系统能为导弹导引头提供逼真的目标及背景红外热图像,是评价导引头性能的重要手段^[1,2]。目标的红外景象被投射到导引头的探测器上时,红外杂散辐射会影响像面能量的均匀性^[3]。所以在针对红外仿真系统制定设计指标时,要对系统的抑杂散辐射性能做出规定,并且用于检测该指标的方法应尽量简单。目标模拟器是仿真系统的重要部分,它模拟的图像辐射照度在 $10^{-10}\text{W}/\text{cm}^2$ 左右或更低,基准探测器很难对此数量级的辐射照度进行直接测量^[4]。某研究所研制的红外仿真系统用像面最大温度偏差这一概念对系统的抑杂散辐射性能做出了规定。所以,在设计阶段给出像面最大温差的理论计算值是必要的。如果像面最大温差值不在要求的范围内,就需要改进仿真系统相关部件的设计。本文给出了计算像面最大温度偏差的方法和相关公式,并且结合实验论述了该计算方法的正确性。

1 红外仿真系统简化模型

一般的红外仿真系统由目标模拟器和三轴转台构成。目标模拟器是仿真系统的关键部分,主要由辐射源、光阑和准直光管组成^[5,6]。三轴转台为导引头提供三维角运动(俯仰、偏航、滚转)环境^[7]。仿真系统机械结构复杂,零部件数量多,难以对整个系统建立完整的杂散辐射模型。在模拟高温目标时,由于物体辐亮度随温度的升高会迅速增大,导致高温物体的辐亮度远大于低温物体,如图1所示^[8]。所以可以忽略低温机械结构发射的红外辐射。对于红外仿真系统的周围环境辐射,在实际仿真过程中可采用恒温罩来消除外界物体的多样性和不确定度^[4]。因此,建立模型时可以只考虑高温物体产生的杂散辐射。

高温辐射源有两种,一是需要模拟的目标辐射,二是目标辐射在系统内多次反射或散射引起的杂散辐射。所以,可把仿真系统简化为面辐射源、辐射源发射窗口真空室、光学准直系统

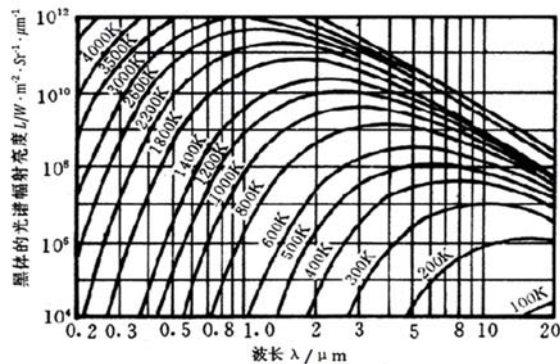


图1 黑体辐射曲线

和镜筒结构。这些结构都可以在杂散辐射分析软件中画出,从而建立仿真系统简化模型。

2 计算方法

2.1 局部辐照度偏差系数

局部辐照度偏差系数表征像面辐照度的最大相对变化量,也能反映像面能量的最大相对变化和像面最大温度偏差。下面介绍局部辐照度偏差系数的计算过程。

通过仿真系统简化模型得到像面辐照度图像后,将其保存为文本格式的文件。在 MATLAB 中打开此文件,将像面分割为若干个面积相同的区域单元,并使相邻区域单元内的辐照度值保持接近。确定区域单元大小后,计算每一区域单元上的辐照度值,得到所有单元的像面平均辐照度 M_{ave} 、单元最大辐照度 M_{max} 、单元最小辐照度 M_{min} 和局部辐照度偏差系数 $\zeta = \frac{(M_{max} - M_{min})/2}{M_{ave}} = \frac{\Delta M}{M_{ave}}$ 。

局部辐照度偏差系数的计算包含了像面最大和最小辐照度值,可以用来表示像面的最大辐照度变化。根据普朗克定律 $M = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$, 其中第一辐射常数 $c_1 = 3.7418 \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$; 第二辐射常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, λ 为波长, T 为温度。在波长范围一定的情况下,辐射出射度只与温度有关^[8]。所以,局部辐照度偏差系数反映了像面温度的最大变化。

2.2 局部辐照度偏差系数与像面最大温差关系式的推导

设像面上的理想温度为 T_L , 实际情况下像面上两区域单元的最大温度偏差为 ΔT 。

设辐射源发射的波段范围是 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 对于规定波段的辐射出射度可以通过对普朗克公式积分求得^[9], 即

$$M = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda}(T) d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (1)$$

只要系统设计合理, 像面没有鬼像, 且模拟的是高温目标, 就会有杂散辐射引起的像面最大温差 $\Delta T T_L$, 此时, 可认为 M_{ave} 与 T_L 满足

$$M_{ave} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda}(T) d\lambda = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (2)$$

杂散辐射引起的像面辐照度改变量为 ΔM , 与此对应的温度改变量为 ΔT

$$\begin{aligned} M_{ave} + \Delta M &= \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda}(T_L + \Delta T) d\lambda \\ &= \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda(T_L + \Delta T)} - 1} d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

将式 (2) 除以式 (3) 可得

$$\frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda}(T_L) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda}(T_L + \Delta T) d\lambda} = \frac{1}{1 + \zeta} \quad (4)$$

式 (4) 即为局部辐照度偏差系数与像面最大温差的关系式。

2.3 像面最大温差计算步骤

红外仿真系统中因杂散辐射产生的像面最大温差可按如下步骤计算:

- (1) 建立简化的红外仿真系统模型;
- (2) 将辐射源设置为模拟温度面辐射源, 追踪适当数量光线;
- (3) 由像面辐照度图像计算局部辐照度偏差系数;
- (4) 根据准直光学系统视场大小, 对局部辐照度偏差系数作出数值修正;
- (5) 由局部辐照度偏差系数与像面最大温差的关系式计算最大偏差温度。

3 算例演示

3.1 算例概述

国内某研究所设计的红外仿真系统, 要求探测器平面的最大温差小于或等于 2°C 。引起像面温差的原因包括电阻阵列芯片表面产生的热反光晕和镜筒壁散射产生的杂散辐射, 不包含由电阻阵列芯片表面反射产生的冷反图像。

3.2 计算过程

在仿真系统设计完成后, 建立简化的红外仿真系统模型。将辐射源设置为待模拟温度的朗伯面光源, 光线数量为 2000 万条并追踪光线, 从辐照度图中可以直接得到像面平均辐照度 $M_{ave}=0.0967 \text{ W/cm}^2$ 。该仿真系统采用的辐射源是 256×256 单元矩阵的电阻阵列, 以 4×4 作为一个局部单元, 将整个像面分成 64×64 个局部单元。分别计算每个单元内的辐照度大小, 得到单元最大辐照度 $M_{max}=0.09815 \text{ W/cm}^2$, 单元最小辐照度 $M_{min}=0.09573 \text{ W/cm}^2$, 局部辐照度偏差系数 $\zeta = \frac{(M_{max} - M_{min})/2}{M_{ave}} = \frac{\Delta M}{M_{ave}} = 1.25\%$ 。

考虑到准直光学系统存在 4° 视场, 当物面能量均匀分布时, 即使不存在杂散辐射的干扰, 像面辐照度也不会均匀分布。中心视场辐照度 E_c 和边缘视场辐照度 E_e 之间满足 $E_e = E_c \cos^4 \omega$ 的关系^[10], 由此计算出中心照度和边缘照度存在着 1% 的原始偏差, 校正后的局部辐照度偏差系数约为 0.74%。

仿真系统电阻阵列工作时模拟的温度是 983 K, 波段范围是 $3.5 \mu\text{m} \sim 5.1 \mu\text{m}$ 。将 $T_L=983 \text{ K}$ 、 $\lambda_1=3.5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2=5.1 \mu\text{m}$ 、 $\zeta = 0.74\%$ 代入公式 (4), 可以计算出像面最大温度偏差 ΔT 约为 2 K。所以, 该红外仿真系统由杂散辐射 (包含电阻阵列芯片表面反射产生的热反光晕和镜筒壁反射) 引起的像面最大温差小于或等于 2°C 。

4 验证实验

为该红外仿真系统设计了像面最大温差测试实验。测试时, 实验室温度为 $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 相对湿度为 40% ~ 70%。当辐射源为点源黑体时, 热像仪的接收面上是一个星点亮斑。星点亮斑

外圆环区域内的最大温差即为像面最大温差。分别在中心视场、0.5 视场、0.7 视场和边缘视场设置星点光源，点光源的温度设置在 710 °C 。下面以点光源设置在中心视场位置为例，说明像面最大温差测量方法。

由于背景测试热像仪需要设置在较低的档位 (0~80°C) ，星点温度超过了量程范围，热像仪焦平面探测器阵列表面星点光源的图像区域处于深饱和状态，这将会使星点图像周围一定范围内出现热晕，使其温度高于范围外的背景温度。为了避免这种现象给测试带来误差，在视场内画出一圆环，圆环内边缘半径大于星点亮斑半径，圆环的外边缘紧贴视场外边缘，测温圆环如图 2 所示。

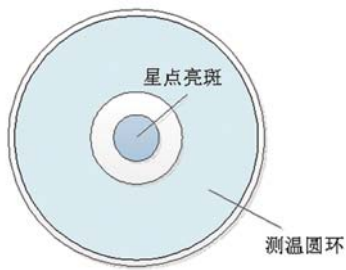


图 2 测温圆环

中心视场实际的像面最大温差的测试结果如图 3 所示。

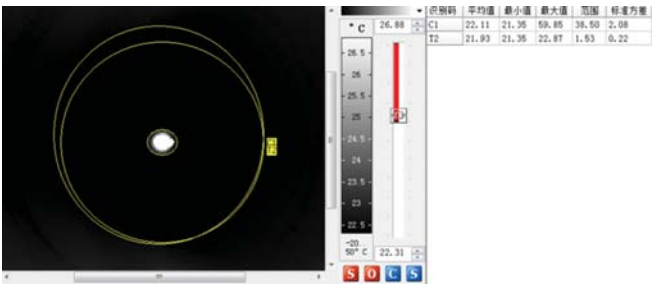


图 3 轴上点产生的像面最大温差

对其他视场做出测试后，红外仿真系统的像面最大温差见表 1 。

经检测，仿真系统的像面最大温差不超过 2°C ，与计算结果相符。

表 1 像面最大温差测试结果

测试项目	技术要求	测试结果
像面最大温差 (轴上点)	≤2°C	1.53°C
像面最大温差 (0.5 视场)	≤2°C	1.90°C
像面最大温差 (0.7 视场)	≤2°C	1.50°C
像面最大温差 (边缘视场)	≤2°C	1.36°C

5 结论

给出了红外仿真系统像面最大温差的计算方法，该方法将像面辐照度偏差与温度偏差联系起来。仿真系统的像面辐照度偏差可通过对其构建简化模型得到，温度偏差可由推导出的公式求得。实验测得的像面温度偏差均在理论计算的最大温度偏差之内，表明本计算方法具有可行性，能够在实际项目中投入使用，同时也说明用像面最大温差衡量仿真系统抑杂散辐射性能的方法合理。

参考文献

[1] Marion S S, William L G, Roheit L M J. Twenty Years of Hardware-in-the-Loop Simulation at Europe Air Force Base [C]. SPIE, 1996, 2741: 20-32 .

[2] 王永寿. 红外仿真器的现状与发展动向 [J]. 飞航导弹, 2003, 15(9): 24-28.

[3] 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2421-2428.

[4] 萧鹏. 红外目标模拟器辐照度测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[5] 马丽华, 乔卫东, 赵尚弘, 等. 红外制导半实物仿真及目标模拟器研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 42-44.

[6] Julia R D, David J M, Robert V, et al. Two-band DMD-based Infrared Scene Simulator [C]. SPIE, 2009, 7210: 72100J.

[7] 苏建刚, 付梦印. 激光末制导炮弹半实物仿真系统 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2469-2472.

[8] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

[9] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.

[10] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.