

大型红外辐射面源的设计

钱 婧^{1,2}, 孙胜利^{1,2}, 于胜云¹, 沙晟春¹, 盛敏健¹, 雍朝良¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 红外辐射面源应用于特定红外特性目标的模拟, 各种红外探测、制导系统的外场测试, 红外目标源标红外辐射性能基本取决于面源温度场的控制。介绍了大型红外辐射面源系统的主要组成, 采用外凸锥型制作辐射源表面以提高红外发射率。采用大功率加热管结合温控仪进行升温控制, 通过分析及计算确定了加热系统的功率, 并通过 CFD 仿真进行了冷却系统的风道设计及风扇选型。实验得出大尺寸辐射面温度的稳定性及均匀性均满足设计要求, 可在 30 min 内将辐射面温度均匀控制在 $[80\text{ }^{\circ}\text{C}, 300\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 范围内, 误差小于 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可以设定温度以模拟不同的红外特性。

关键词: 红外辐射源; 温控; 黑体; 热设计

中图分类号: TN216; TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0031-05

Design of large size infrared radiant planar source

Qian Jing^{1,2}, Sun Shengli^{1,2}, Yu Shengyun¹, Sha Shengchun¹, Sheng Minjian¹, Yong Chaoliang¹

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Detecting & Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Infrared radiant planar source is used to simulate certain infrared characteristic target, widely used in different infrared detection, controlling and guiding equipment's outer field test. The performance of infrared radiant planar source basically depends on its temperature field control. The structure and main parts of radiant planar source were described. Taper shape was adopted at planar surface to increase the infrared emissivity. High power heater controlled by temperature controller was used for heating. The heating power was determined by thermal analysis and calculation. The air duct was designed and suitable cooling fans were selected through CFD simulation. The experiment results show that the temperature stability and uniformity of whole radiant plane fulfill the requirement. The radiant source can be adjusted at any temperature in a range of $[80\text{ }^{\circ}\text{C}, 300\text{ }^{\circ}\text{C}]$ within 30 min. The temperature deviation is less than $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. The radiant source can simulate different infrared behaviors by setting different work temperature.

Key words: infrared radiant planar source; thermal control; black body; thermal design

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-06-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(CX200502030)

作者简介: 钱婧(1982-), 女, 助理研究员, 主要从事遥感仪器热控技术方面的研究。Email: hitqj@163.com

0 引言

利用物体红外特性进行探测、制导的各种探测器及制导设备已广泛应用于民用及军用领域。为红外相机、探测器及制导系统的性能测试提供目标,通常需要设计相应红外性能的辐射源。

任何物体的红外特性都由其温度及表面的发射率决定,如目标体通过精确控制辐射温度,并使其发射率趋近于 1,以展示其相应波段的辐射特性^[1]。这种辐射源目标体也被称为黑体。

黑体分为空腔黑体与面型黑体两种,前者发射率较高,可用于红外热像仪等设备的标定^[2]。后者可直接应用于红外探测设备的测试或性能评估^[3]。

面源黑体的制备需要保证辐射面温度的一致,因此目前多数面源黑体尺寸都相对较小^[4]。面型尺寸增大会增加温度均匀控制的难度,带来发热量的急剧增加,为冷却系统带来新的挑战。

文中介绍的大型红外辐射面源的有效辐射面尺寸达 950 mm×950 mm。

1 系统方案

1.1 系统主要组成

大型红外辐射面源系统主要包括三个部分。

(1) 辐射源主结构,为主要的工作部分,包括辐射体、加热电路、冷却系统及其他附属的电气、结构部件;

(2) 控温仪,用于控制红外辐射源温度,通过读取辐射源上分布在各处的铂电阻温度数据,控制加热电路或冷却系统进行升温或降温^[5];

(3) 工控机,用于用户进行红外辐射源系统的操作,通过 CAN 数据总线与控温仪连接,用户可通过工控机设定红外辐射源的温度值及工作状态。

整个红外辐射源系统的组成如图 1 所示。

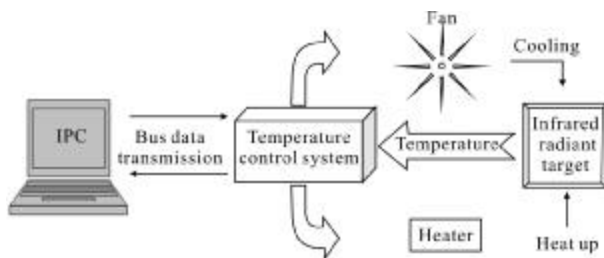


图 1 红外辐射源系统示意图

Fig.1 Diagram of radiant planar source system

1.2 辐射体的组成

工作的辐射体安装于辐射盒内,因辐射体的工作温度在 80~300 °C 之间,需要在辐射体与其他机械结构、电气部件之间进行隔热设计。采用玻璃纤维绵进行隔热,为减轻标体重量,辐射盒采用轻质铝合金钣金件。辐射盒内安放辐射体、部分控制电路及冷却风扇系统。其主要组成如图 2 所示。

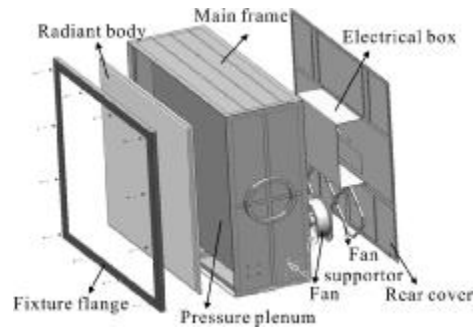


图 2 辐射盒的主要部件

Fig.2 Main components of radiation chassis

在辐射体表面喷涂发射率极高的耐高温防腐黑漆,该黑漆与辐射体基材结合性好,热膨胀系数匹配,当辐射体在 300 °C 长期工作时不会发生变色、剥离、掉落等现象影响辐射面发射率。

同时,为加强表面发射率,在辐射体表面采用外凸锥台用于发射率的加强,如图 3 所示。



图 3 辐射体的辐射腔单元

Fig.3 Radiation cavity element of radiation body

外凸锥台可以有效地增强面源的发射率,表面黑漆的法向发射率为 0.875,最后的产品经验收送样测试,测得实际的法向发射率为 0.951,达到了增强发射率的目的。

2 热控设计

2.1 加热系统设计

根据能量守恒方程设计红外辐射源所需的加热功率,对于辐射体而言,工作的主要热量损失为向空间的辐射热及与表面空气的对流换热,可以由下式

进行所需功耗的计算。

$$Q_{total} = Q_{radiation} + Q_{convection} + Q_{other} = \varepsilon\sigma A(T_4 - T_{sky}^4) + Ah(T - T_{ambient}) + Q_{other} \quad (1)$$

式中: A 为辐射体的工作表面积, $A=0.95 \times 0.95 \text{ m}^2$;发射率 $\varepsilon=1$; T_{sky} 为与辐射进行辐射交换的天空温度, $T_{sky}=4 \text{ K}$; $T_{ambient}$ 为环境温度,在这里设定最低的环境温度为 $-35 \text{ }^\circ\text{C}$; h 为辐射体表面换热系数,因辐射体表面温度较高且表面为锥形腔结构,将对流换热系数假设为较恶劣情况下的湍流自然对流换热,设 $h=25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$; T 为辐射源的最高工作温度, $T=300 \text{ }^\circ\text{C}$, Q_{other} 为红外辐射源其他方向的漏热及设计余量,在文中红外辐射源设计中,取 $Q_{other}=0.11 \times (Q_{radiation} + Q_{convection})$,最终计算得红外辐射源所需的加热功率为 14.454 kW 。

在辐射体的背面开槽,分为6个区域均匀埋入总功率为 14 kW 的回形加热管及测温铂电阻,各区进行独立的PID温控,如图4所示。



图 4 埋入辐射体背部的加热管

Fig.4 Heater embedding in the backside of radiation body

2.2 冷却系统的设计

为确保辐射源在 30 min 从 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 降温至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,采取强迫风冷方式对辐射体冷却。在红外辐射面源的设计中,因风道较简单,沿程压力损失较小,而散热量大,需要较多的冷却风量,因此采用风压较低但出风量较高的交流轴流风扇并联进行冷却。

风扇设计选型时,使用仿真软件建立模型,得出系统在风量 Q_0 下的系统阻抗 ΔP_0 。系统风流的压力损失与流速及流体的状态及性质有关,工程实际中的流体基本上视作湍流流体。系统的压力损失 ΔP 与流量 Q 关系可以表示为:

$$\Delta P = f \cdot Q^2 \quad (2)$$

式中: f 为常数。图5列出了单个风扇及两个风扇并联时的压力-流量曲线与系统阻抗曲线的匹配,并给

出了风扇并联的工作点。

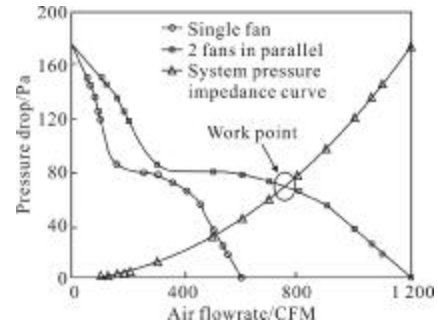


图 5 风扇 P-Q 曲线及系统压力阻抗曲线

Fig.5 P-Q curves of fan and the system pressure impedance

为达到快速降温的目标,在辐射盒内设计专用冷却系统。采用2个 120 cm 的轴流风扇,为避免高温辐射体对风扇造成损坏,在轴流风扇与辐射体之间安装风道挡板,该风道挡板不仅隔离辐射体的高温辐射热,还可以在辐射体与挡板间形成风流的静压腔。静压腔有效保证辐射体的均匀降温,避免冷却气流对辐射体局部冲刷,降温不均匀导致辐射体的结构变形。

利用商业软件NX/TMG仿真得出辐射体从最高温度 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下 30 min 之内的降温曲线,如图6所示。结果表明,在风扇与辐射体间设计风道挡板,可在 30 min 之内完成降温。

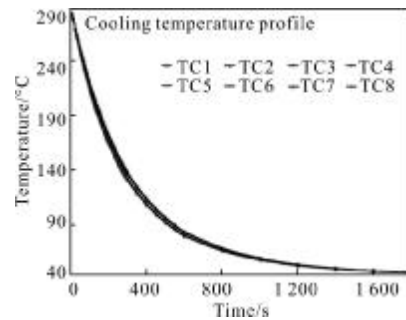


图 6 辐射源的降温曲线

Fig.6 Cooling temperature profile of radiant target

3 实验结果

3.1 温度稳定度与均匀性测试

红外辐射面源对温度均匀性及稳定性的要求很高,在实验时必须测量整个红外辐射源的表面温度均匀性及稳定性。根据斯特潘-波耳兹曼辐射定理,整个红外辐射源的辐射出度与温度的4次方成正比。

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

对公式(3)取微分可求得温度变化率与辐射度变化率之间的关系为:

$$\frac{dE}{E} = \frac{4dT}{T} \quad (4)$$

由公式(4)可以算出,在 300 °C 时温度变化 ± 2 °C, 开氏温度的变化率为 0.35%, 导致的辐射度变化为 1.396%。

辐射源温度的稳定度及均匀度可以用多次实验的温度值的标准方差来评估^[6]。在实验中,对辐射面上的 8 个测温点进行 15 次测试,实验表明,对于每个测温点,各次测得温度的波动范围在 ± 1 °C 以内,而对同时测得的 8 个测温点,其温度与辐射面的平均温度偏离在 ± 1.5 °C 以内,辐射面温度见图 7,每次测试时,各测量点温度与该次测得的辐射面平均温度值差异见图 8。对实验数据取标准偏差,得到工作温度为 300 °C 时,辐射表面的温度稳定性偏差为 0.28 °C,控温精度为 1.35 °C,辐射温度均匀性为 1.194 °C。

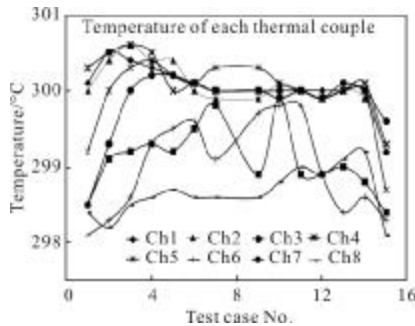


图 7 15 次测试中各点的温度值变化

Fig.7 Temperature change of each measured point in 15 test cases

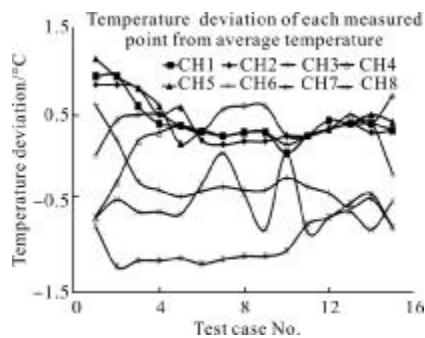


图 8 15 次测试中各点的温度值与表面平均温度的差异

Fig.8 Temperature deviation of each measured point compared with the average temperature in 15 test cases

3.2 红外辐射源的红外目标特性

通常,红外探测器的工作波段为 $[3 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 及 $[8 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}]$ 。对于面积为 A 的红外辐射面源在某波段区间 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 内的辐射能量,可以采用普朗克公式的积分形式进行计算:

$$E_{\lambda_1, \lambda_2} = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon(\lambda) c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} d\lambda \quad (5)$$

式中: λ 为计算的光谱波段 (μm); T 为物体表面温度 (K); $\varepsilon(\lambda)$ 为物体表面的单色发射率,这里统一取为发射率 $\varepsilon_n = 0.951$; c_1 为普朗克定律第一辐射常数 $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ (Wm}^2\text{)}$; c_2 为普朗克定律第二辐射常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ (mK)}$ 。

采用改进的三阶 Gauss-Legendre 积分法编制程序,由公式(5)计算出面源在 $[3 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 波段, $[8 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}]$ 波段以及全波段的辐射能量见图 9。

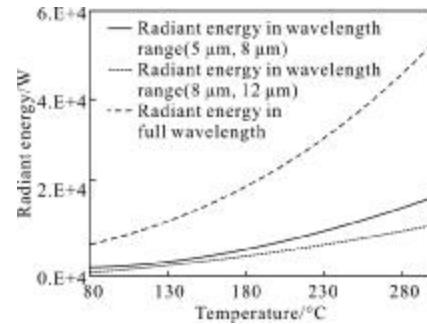


图 9 辐射源在指定波段上的辐射能量

Fig.9 Radiant energy of radiant target at certain wavelength range

4 结束语

文中介绍的有效辐射面积达 $950 \text{ mm} \times 950 \text{ mm}$ 的大型红外辐射面源的表面发射率及热控设计。最终对辐射面源的测试表明设计完全达到预先要求的指标。包括其发射率在 0.9 以上,整个面源的温度稳定度在 3 °C 以内,整个面源的均匀性在 ± 2 °C 以内,可以在 30 min 内在整个工作温度范围内工作,由于对热控系统进行了精确性的设计,总重量也控制在 100 kg 左右,同时,精确化的热控设计也将最大功率控制在 15 kW 以内,满足了客户外场使用的需求。

参考文献:

- [1] Duan Yuning, Yuan Zundong, Wu Jiyu. Approximate calculating methods for cavity effective emissivity of

- temperature homogeneous blackbody[J]. *Modern Measurement and Test*, 2000(4): 3-8. (in Chinese)
- 段宇宁, 原遵东, 吴继彧. 温度均匀黑体空腔有效发射率近似计算方法 (黑体辐射源研究之一)[J]. *现代计量测试*, 2000(4): 3-8.
- [2] Liu Hongyan, Wang Yiping, Yuan Bing, et al. New blackbody radiation source for calibration of infrared thermal imager [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(5): 533-535. (in Chinese)
- 刘鸿雁, 王一平, 袁兵, 等. 标定红外热像仪的一种新型黑体辐射源[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(5): 533-535.
- [3] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 266-270. (in Chinese)
- 唐嘉, 高昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S): 266-270.
- [4] Xu Heng, Han Yizhong, Yang Yonjun. Development of blackbody source [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2009, 29(5): 1-3. (in Chinese)
- 徐恒, 韩义中, 杨永军. 黑体辐射源的发展 [J]. *计测技术*, 2009, 29(5): 1-3.
- [5] Yu Shengyun, Qian Jing, Yong Chaoliang. Temperature control system and performance test method for new infrared radiant target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 199-202. (in Chinese)
- 于胜云, 钱婧, 雍朝良, 等. 红外辐射源标温控及性能测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 199-202.
- [6] Li Yunhong, Sun Xiaogang, Lian Jihong. Research on performance testing of thermal infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 459-462. (in Chinese)
- 李云红, 孙晓刚, 廉继红. 红外热像系统性能测试研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 459-462.

下期预览

舰船尾流红外图像边界检测方法

王慧丽, 齐 异, 刘焕英

(水下测控技术国家级重点实验室, 辽宁 大连 116013)

摘要: 由于舰船尾流与周围未扰动的海水相比温差较小且无明显轮廓, 这导致舰船尾流红外图像成像模糊、对比度低, 难以提取其边缘信息。根据舰船尾流及其红外图像的特点, 提出了一种利用动态纹理和数学形态学检测尾流边界的方法。利用动态纹理分割方法对舰船尾流红外图像序列进行了预分割, 然后采用 Canny 算子对尾流区进行边缘提取。对提取的边缘利用形态学的方法进行膨胀、标记和选择, 提取了真正的尾流边界。实验结果表明, 该方法对舰船尾流红外图像序列进行处理, 能够有效地提取尾流的边界, 取得了较好的处理效果。