

空间特定目标表面的双波段红外辐射特性调控方法

杨志远¹, 王 晗², 王 超², 孙玉斌³, 周云生³, 王如志²

(1 北京航天长征飞行器研究所 北京 100076

2 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124

3 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 红外诱饵等空间特定目标是对抗红外探测的主要手段之一。随着双色制导技术的发展, 红外探测灵敏度不断提升, 目标识别能力不断增强, 这对空间特定目标表面的双波段红外辐射的逼真性提出了要求。通过改变空间特定目标表面发射率控制其红外辐射强度的大小, 使用数值仿真的方法进行计算, 从而提出了对空间特定目标表面红外辐射特性的调控方法。此外根据所确定的表面发射率、可见光吸收及红外发射比例以及内热源功率, 选择合适的表面材料以及热功率施加方法, 在保证空间特定目标表面机械性能的同时, 使空间特定目标满足光照及阴影区的双波段红外辐射特性要求, 并进行模型的制作以及热真空实验, 证明了理论计算的准确性。

关键词: 数值仿真; 红外空间特定目标; 辐射特性

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)06-0091-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210701002

引用格式: 杨志远, 王晗, 王超, 等. 空间特定目标表面的双波段红外辐射特性调控方法[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 91-97.

Surface structure design and prototype production of dual-band infrared space-specific target

YANG Zhiyuan¹, WANG Han², WANG Chao², SUN Yubin³, ZHOU Yunsheng³, WANG Ruzhi²

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;

2. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;)

Abstract: Space specific targets such as infrared decoys are one of the main means to combat infrared detection. With the development of two-color guidance technology, the infrared detection sensitivity is continuously improved and the target recognition ability is continuously enhanced, which puts forward requirements for the fidelity of dual band infrared radiation on the surface of specific space targets. In this paper, the surface emissivity of space specific target is controlled, and the infrared radiation intensity is calculated by numerical simulation, so the regulation method of infrared radiation characteristics of space specific target surface is proposed. In addition, appropriate surface materials and thermal power application methods are selected according to the determined surface emissivity, visible light absorption and infrared emission ratio and internal heat source power, so as to ensure the surface mechanical properties of the specific space target and make the specific space target meet the requirements of dual band infrared radiation characteristics in the light and shadow area, and carry out the model making and thermal vacuum experiment, in which way the accuracy of theoretical calculation is proved.

Key words: Numerical simulation; Infrared space-specific target; Radiation characteristics

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210701002

Citation: YANG Zhiyuan, WANG Han, WANG Chao, et al. Surface structure design and prototype production of dual-band infrared space-specific target[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 91-97.

引言

目前, 对抗红外探测识别的有效方法是降低目标的红外辐射, 并释放模拟目标光电特征的红外空间特定目标^[1]。红外诱饵等空间特定目标主要有三种类型: 运动型、面源型和光谱型。运动型红外空间特定目标主要在其运动特性上进行了改进, 通过燃料的燃烧或空间特定目标系统改善了运动特性, 达到更好的对抗红外探测识别效果^[2]。面源型红外空间特定目标主要利用一些特殊材料的化学反应在较大面积上产生与目标相近的红外辐射, 以此来混淆红外探测识别^[3,4]。光谱型红外空间特定目标则采用特殊的燃料和添加剂, 使得燃烧产生和目标相似的光谱分布, 主要针对具有光谱识别技术的红外探测^[5]。

本文分析了表面温度对空间特定目标双波段红外辐射强度比例的影响, 提出了两种方法控制空间特定目标的平衡温度, 进而控制双波段辐射强度比例, 并结合空间特定目标表面发射率的改变控制红外辐射强度。

1 红外空间特定目标表面结构设计

1.1 红外辐射基本原理分析

普朗克辐射定律描述了黑体辐射的光谱分布, 又称为普朗克公式, 其定义式为^[6]:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

式中, M_{λ} 为黑体光谱辐射出射度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$); λ 为波长 (μm); T 代表绝对温度 (K); c_1 为第一辐射常数 ($c_1 = 2\pi^5 c_2^5 / 15 = 3.7415 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$); c_2 为第二辐射常数 ($c_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{K}$)。

普朗克公式揭示了物体热辐射的基本规律, 给出了黑体在温度为 T 时不同波长光谱的辐射率。当温度一定时, 黑体在不同波段内的辐射强度也随之确定, 灰体也是如此。所以, 在模型处于不同温度时, 波长为 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 以及 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 的辐射强度具有不同的比例。

斯蒂芬-玻尔兹曼定律是广义普朗克辐射定律的一个特殊结论, 它给出了黑体全辐射出射度与温度的关系^[13]:

$$M = \frac{c_1}{c_2^4} T^4 \cdot \frac{\pi^4}{15} = \sigma T^4 \quad (2)$$

式中, $\sigma = (5.6697 \pm 0.0029) \times 10^8 (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$ 。

该定律表明, 黑体的全辐射出射度与其温度 T 的 4 次方成正比。因此, 温度很小的变化会引起辐射出射度很大的变化。

空间特定目标可看作是灰体, 也即空间特定目标表面的发射率是与温度和波长无关的常数。则空间特定目标表面材料在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 间的积分辐射功率可以表示为:

$$P_{m, \lambda_1 \sim \lambda_2} = \varepsilon_m P_{bb, \lambda_1 \sim \lambda_2} \quad (3)$$

式中, ε_m 表示表面材料的发射率; P 代表辐射强度。

2 红外空间特定目标红外特性控制方法研究

2.1 空间特定目标表面温度的控制

对在太空中处于热平衡状态下的一个物体:

$$P_E = P_A + W \quad (4)$$

式中, P_E 是物体的发射功率, P_A 是物体的吸收功率, W 是对象内部产生的其他功率。在此, 我们将忽略 W , 因此, $P_E = P_A$ 。

在阳光照射下处于热平衡状态下的物体的平衡温度为 T_{eq} :

$$P_E = A_S \varepsilon_{IR} \sigma T_{eq}^4 \quad (5)$$

$$P_A = A_c [(S + S_R) \alpha_V + \alpha_{IR} E] \quad (6)$$

式中, A_S 和 A_C 分别为物体的表面面积以及横截面面积, ϵ_{IR} 是物体红外波段的平均发射率, S 是太阳出射度 (1360 W/m^2), S_R 是来自地球反射的太阳通量 (被称为反照率通量, 通常取 $0.3 S$), E 为地球红外通量 (约 240 W/m^2), α_V 为可见光和近红外波段上物体的平均吸收率, α_{IR} 是在红外波段上平均的物体吸收率。

对于处于热平衡状态的物体, 利用 $\alpha_{IR} = \epsilon_{IR}$ 的事实, 式 (6) 可以重写为:

$$P_A = A_c [(S + S_R)\alpha_V + \epsilon_{IR} E] \tag{7}$$

通过组合式 (5)、式 (6) 和式 (7), 我们得到了平衡温度 T_{eq} 的方程, 条件是 $W=0$:

$$T_{eq} = \left[\frac{(A_c/A_S)[(S + S_R)\frac{\alpha_V}{\epsilon_{IR}} + E]}{\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

由此可以得出, 通过对 A_C/A_S 及 α_V/ϵ_{IR} 进行控制均可控制空间特定目标在光照区的平衡温度, 在此假定空间特定目标 $A_C/A_S=0.317$ 不变, 若材料 $\alpha_V/\epsilon_{IR}=1$, 其从 293.15 K 释放后表面温度的变化情况如图 1 所示, 空间特定目标表面温度在释放后稳定上升, 并最终稳定于 325 K 左右。

由于不同材料的 α_V/ϵ_{IR} 的比值不同, 因此 α_V/ϵ_{IR} 比值对模型的平衡温度有着至关重要的影响, 进一步影响双波段辐射强度比例。由图 2 (a) 可以看出, 随着空间特定目标表面 α_V/ϵ_{IR} 比值的变化 ($0.2\sim 5$), 其平衡温度从 217 K 上升至 486 K , 其双波段辐射强度比例从 0.00325 上升至 0.407 , 由此可见, 通过选择不同 α_V/ϵ_{IR} 比值的表面材料便可以对空间特定目标在光照区表面双波段红外辐射强度间的比例进行调控。但是 α_V 的值最大为 1 , 若选用的 α_V/ϵ_{IR} 比例较大, 则要求 ϵ_{IR} 值较小, 这就限制了其红外辐射强度。除此调控方式外, 还可以采用施加内热源功率的方式调控空间特定目标的表面平衡温度, 此时光照区的平衡温度表达式如公式 (9) 所示。

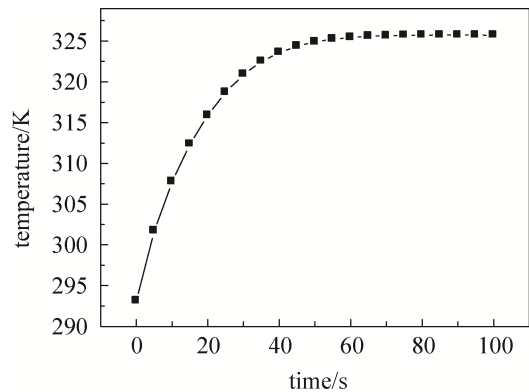


图 1 $\alpha_V/\epsilon_{IR}=1$ 时, 空间特定目标释放后表面温度的变化情况

Fig. 1 $\alpha_V/\epsilon_{IR}=1$, the change of surface temperature after the release of space specific target

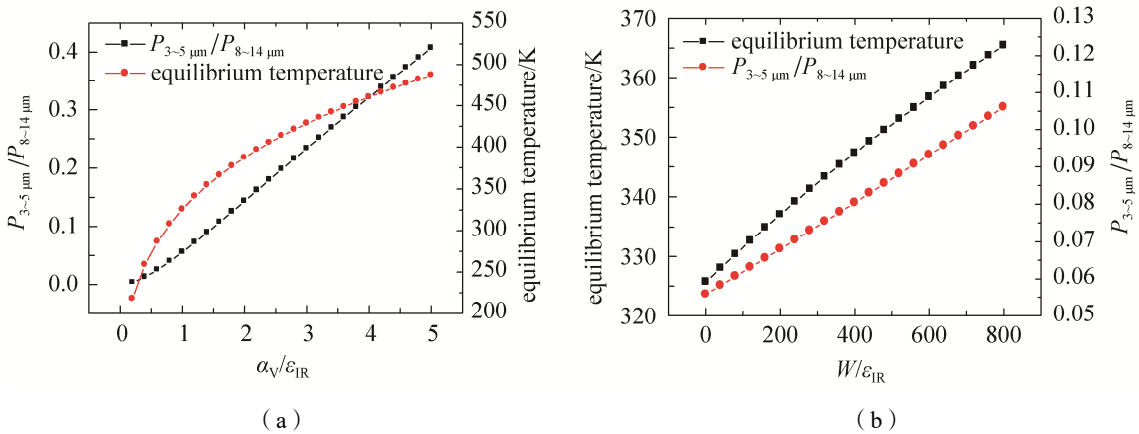


图 2 α_V/ϵ_{IR} 的比值对于平衡温度及双波段辐射强度比例的影响

Fig. 2 Effect of α_V/ϵ_{IR} ratio on equilibrium temperature and ratio of dual band radiation intensity

从图 2 (b) 中可以发现, 通过调节 W/ϵ_{IR} 的比例也可对空间特定目标表面温度进行调控进而控制红

外双波段辐射强度的比例。假设空间特定目标表面的 $\alpha_V/\epsilon_{IR}=1$, $\epsilon_{IR}=0.9$ 且 $A_S=2.16\text{ m}^2$, 随着内热源功率的增加, 其表面平衡温度呈现上升的趋势, 从 $W/\epsilon_{IR}=0$ 时的 325 K 上升至 $W/\epsilon_{IR}=800$ 时的 365 K, 其双波段辐射强度比例从 0.056 上升到了 0.11。所以, 在光照区空间特定目标表面红外双波段辐射强度的控制可以通过表面温度来控制, 在对 ϵ_{IR} 要求不高时, 可以通过 α_V/ϵ_{IR} 的比例选择合适的表面材料来调控表面温度; 而对 ϵ_{IR} 要求较高时, 可以外加功率热源, 通过调节 W/ϵ_{IR} 的比例来控制空间特定目标表面温度。

$$T_{eq} = \left[\frac{(A_c/A_s)[(S+S_R)\frac{\alpha_V}{\epsilon_{IR}} + E]}{\sigma} + \frac{W}{A_s\epsilon_{IR}\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

对于处于地球阴影中的空间物体, 情况则大不相同。由于太阳光通量 S 和地球反照率 S_R 均为 0, 在这种情况下, 平衡温度的方程式 (8) 减少到

$$T_{eq} = \left[\frac{(A_c/A_s)E}{\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

经计算得出, 处于地球阴影中近地轨道上空空间特定目标的平衡温度为 191.39 K 左右, 与可见光和近红外波段上物体的平均吸收率以及物体红外波段的平均发射率及其比值 α_V/ϵ_{IR} 无关, 则无法通过 α_V/ϵ_{IR} 来控制空间特定目标表面的红外辐射特性, 此时将一空间特定目标从室温 (293.15 K) 状态下释放后, 其表面温度的变化如图 3 所示。

若想对空间特定目标双波段的红外辐射强度比例调节, 需要外加内热源对其表面温度进行控制。在外加热源条件下, 其平衡温度公式为:

$$T_{eq} = \left[\frac{0.317E}{\sigma} + \frac{W}{A_s\epsilon_{IR}\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

从上述公式可以得出结论, 其在阴影区的平衡温度与外加功率和红外发射率的比值 W/ϵ_{IR} 有关。计算空间特定目标平衡温度及双波段辐射照度的比例与 W/ϵ_{IR} 的关系, 如图 4 所示。为空间特定目标表面施加 W/ϵ_{IR} 为 0~600 的热功率时, 其平衡温度从 190 K 上升至 281 K、双波段辐射强度比例从 0.000 95 上升至 0.022。由此可见, 通过施加不同大小的热功率便可以对空间特定目标在阴影区表面双波段红外辐射强度的比例进行调控。

2.2 空间特定目标表面红外辐射强度调控方法

根据公式 (2) 及公式 (3), 假设空间特定目标为灰体, 在其双波段红外辐射强度比例确定后, 通过对材料表面发射率的调控, 便可以对空

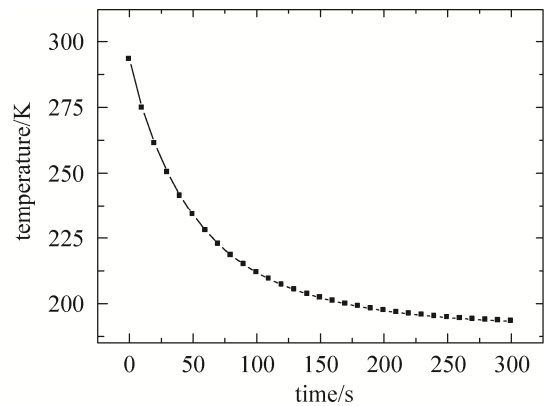


图 3 空间特定目标释放后表面温度的变化
Fig. 3 Change of surface temperature after release of space specific target

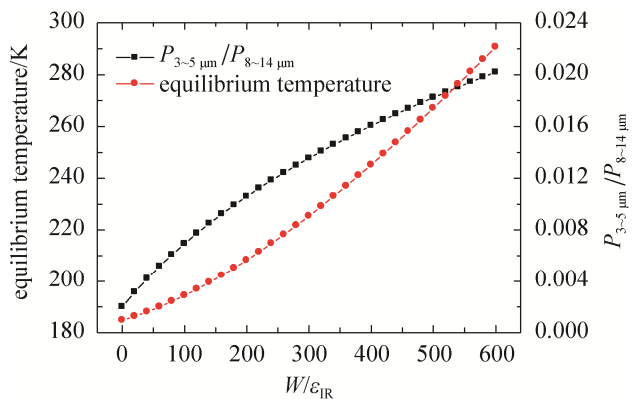


图 4 W/ϵ_{IR} 的比值对于平衡温度及双波段辐射强度比例的影响

Fig. 4 Effect of W/ϵ_{IR} ratio on equilibrium temperature and dual band radiation intensity ratio

间特定目标表面的红外辐射强度进行控制而不改变双波段红外辐射强度之间的比例。不同发射率下空间特定目标在阳光及阴影区波长为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 及 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 的辐射强度仿真结果如图 5 所示。可以看到,随着发射率的增加,空间特定目标表面的红外辐射强度线性增加,所以,可通过空间特定目标表面发射率来调控其红外辐射强度。

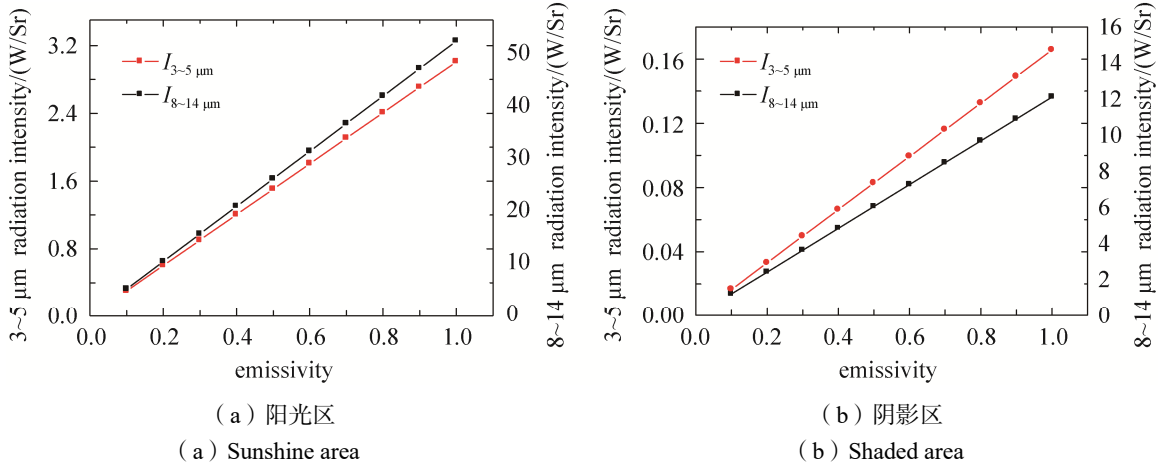


图 5 材料发射率对双波段辐射强度的影响
Fig. 5 Effect of material emissivity on dual band radiation intensity

3 表面结构的设计及实验验证

3.1 表面结构设计方法

根据以上所提空间特定目标表面红外辐射强度控制方法而提出的表面结构设计方法,如图 6 所示。

3.2 表面结构的设计

基于高电热转换效率的新型碳纳米管红外发热膜对模型表面温度的调控,对模型表面结构进行设计。结构由三层组成:最底层为聚酰亚胺膜;中间层为剪裁成矩形呈阵列状布置于聚酰亚胺膜上的碳纳米管发热膜,通过电学方法施加内热源功率;最外层为高发射率涂层,其成分为碳纳米管辐射散热浆料,通过对不同成分浆料的混合即可对其发射率进行控制。实现对其表面温度及发射率的控制,进而对空间特定目标表面双波段红外辐射强度比例以及大小进行控制。

为保证空间特定目标表面温度均匀,将新型碳纳米管发热膜分为四组布置于空间特定目标表面,每组新型碳纳米管发热膜分别由一块氟化碳电池进行直流供电。每组内四块碳纳米管发热膜采用并联方式进行连接,所以在电池放电时作用在每块碳纳米管发热膜上的电压是相同的,以此保证单位面积发热膜上消耗的电功率相同,采用此种连接方式可以保证单位面积单位时间上的产热功率相同,自发热薄膜的控制电路如图 7 所示。

由光学传感器对空间特定目标所处环境进行监测,若其处于光照区,断开电路开关 K1,通过空间特定

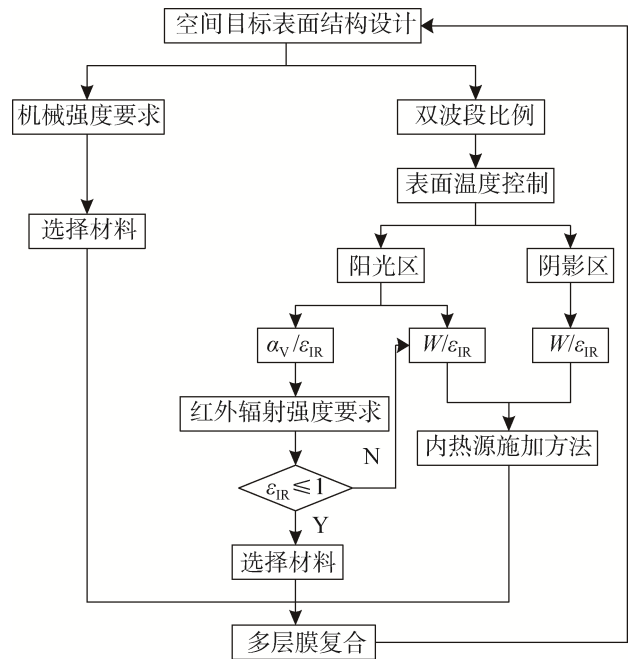


图 6 空间特定目标表面结构设计方法
Fig. 6 Surface structure design method of space specific target

目标表面材料 α_V / ϵ_{IR} 的比值进行温度控制; 若其处于阴影区, 闭合电路开关 K1, 对自发热薄膜供电进行表面温度调控。

3.2 模型的制作

为保证模型的参考价值, 使用与红外空间特定目标类似的方式进行模型的膜层布置。为保证样机在测试过程中不与内部骨架产生较大的热传导, 影响测试结果的准确性, 在多层柔性可折叠膜与 3D 打印样机骨架之间首先需要包覆一层隔热膜层。对于多层柔性可折叠膜, 内层为聚酰亚胺膜, 中层为新型碳纳米管红外发热膜, 最外层则采用涂敷有碳纳米管辐射散热浆料的聚酰亚胺薄膜, 最外层聚酰亚胺薄膜发射率约为 0.77。

通过上述几层膜层的布置, 既控制了模型多层可折叠柔性膜的强度以及表面发射率, 又保证了其内热源功率的施加, 为在阴影/光照区的红外特性调控提供了保障。

3.3 试验验证

对所建立的模型进行热真空测试, 在真空罐中建立如下环境以模拟空间特定目标在阴影区的工环境:

- ① 真空度低于 1×10^{-2} Pa;
- ② 保温罩初温为 300 ± 5 K;
- ③ 地球辐射热通量为 230 W/m^2 ;
- ④ 热沉温度低于 150 K;
- ⑤ 空间特定目标转速低于 $10^\circ/\text{s}$ 。

在热真空试验中, 使用四组热电偶 (编号分别为热电偶 1~热电偶 4) 及热像仪为一组红外发热膜附近的空间特定目标表面进行温度检测, 在为其施加 10 W 电功率时, 其稳定后的温度测试结果见表 1。

此四点的平均温度高于不加热源时空间特定目标于阴影区的平衡温度 191.39 K, 证明了此热功率施加方式对空间特定目标表面温度调节的有效性。但根据外加热源时平衡温度的计算公式, 在外加 10 W 的热源功率时, 其平衡温度应为 215.53 K, 低于试验中测试温度, 造成此差异的主要原因可能是

由于膜层热导率较低, 无法将发热膜上热量传导至发热膜间缝隙处。当发热膜表面平均温度为 246.35 K 时, 处于发热膜缝隙处的温度约为 227.5 K。换言之, 在阴影条件下, 施加 10 W 的热功率只保证了发热膜处的表面温度, 而缝隙处温度较低。如何保证表面温度整体均匀性以及如何在温度分布不均匀的条件下对空间特定目标表面辐射强度进行调控, 有待进一步研究及探索。

同时, 由于多层膜间的结合并不紧密, 导致其释放后温度下降过程十分缓慢, 所测得的温度并非平衡温度, 这也是导致理论与实际出现差异的原因之一, 试验所展示出的结果降低了所需能耗, 有利于器件的设计制作, 但如何对其温度进行精确控制仍需进一步研究。

4 结束语

本文提出了一种基于双波段红外辐射的空间特定目标表面设计方法, 通过表面温度及发射率来共同调控空间特定目标的双波段红外辐射强度。对于平衡温度的调控, 在光照区通过调控可见光吸收率与红外发射率之间的比例或施加热源的方式进行温度的控制, 在阴影区则通过施加内热源的方法来提升其平衡温度。对于表面发射率的调控, 通过对不同成分碳纳米管涂料浆料的混合即可实现。通过多层膜的复合既控制了空间特定目标多层可折叠柔性膜的强度以及表面发射率, 又保证了其内热源功率的施加。此

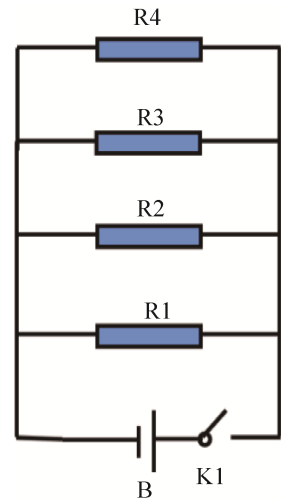


图 7 自发热薄膜的控制电路设计

Fig. 7 Control circuit design of self heating film

表 1 热真空试验温度测试结果

编号	稳定温度
热电偶 1	248.5 K
热电偶 2	249.1 K
热电偶 3	253.2 K
热电偶 4	249.8 K

外,制作了模型并进行热真空试验,结果证实了设计的有效性,但对其温度的精确控制还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 淦元柳,蒋冲,刘玉杰,等.国外机载红外诱饵技术的发展[J].光电技术应用,2013,28(6):13-17.
GAN Yuanliu,JIANG Chong,LIU Yujie,et al. Development of foreign airborne IR decoy technology[J]. Electro-Optic Technology Application,2013,28(6):13-17.
- [2] 唐善军,杨贝尔,许凌飞,等.基于目标和红外诱饵运动模式的抗干扰技术研究[J].上海航天,2017,34(S1):44-49.
TANG Shanjun,YANG Beier,XU Lingfei,et al. Research on anti jamming technology based on target and infrared decoy projectile motion mode[J]. Aerospace Shanghai,2017,34(S1):44-49.
- [3] 童奇,李建勋,方洋旺,等.面源红外诱饵对抗成像制导导弹的仿真研究[J].红外与激光工程,2015,44(4):1150-1157.
TONG Qi,LI Jianxun,FANG Yangwang,et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile[J]. Infrared and Laser Engineering,2015,44(4):1150-1157.
- [4] 田晓飞,马丽华,洪华,等.面源红外诱饵的干扰特性分析及模拟研究[J].激光与红外,2012,42(2):165-169.
TIAN Xiaofei,MA Lihua,HONG Hua,et al. Study on jamming characteristic and simulation of surface-type infrared decoy[J]. Laser&Infared,2012,42(2):165-169.
- [5] 张静元,过凯,蒋冲,等.国内外光谱型诱饵技术的发展研究[J].光电技术应用,2019,34(2):6-10.
ZHANG Jingyuan,GUO Kai,JIANG Chong,et al. Development research on spectral decoy technology at home and abroad[J]. Electro-Optic Technology Application,2019,34(2):6-10.
- [6] YANG S Q,WANG B J,YI X,et al. Infrared decoys recognition method based on dual-band information fusion[J]. Infrared Phys Technol,2014,67:542-546.

[作者简介]

杨志远 1974年生,高级工程师,主要研究方向为航天电子对抗电气系统设计。

王 晗 1994年生,在读博士研究生,主要研究方向为新型半导体材料及器件的设计与仿真。

王 超 1988年生,在读博士研究生,主要研究方向为电磁超表面设计。

孙玉斌 1983年生,工程师,主要研究方向为信息对抗。

周云生 1963年生,博士,研究员,研究方向为航空航天信息对抗技术。

王如志 1973年生,教授,主要研究方向为新能源材料及新型半导体光电功能材料的设计、制备与器件应用。

(本文编辑:杨秀丽)