

长航时 UAV 蒙皮红外辐射强度的工程计算

黄章斌¹, 李晓霞^{1,2}, 郭宇翔¹, 马德跃¹, 赵亮¹

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 电子工程学院, 安徽 合肥 230037;
2. 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)蒙皮的红外辐射特性是对 UAV 进行探测识别的重要依据,而 UAV 蒙皮的气动力加热、太阳辐射换热、地球辐射换热等是影响 UAV 蒙皮辐射特性的主要因素。在综合考虑了环境以及 UAV 自身辐射的情况下,建立了 UAV 蒙皮红外辐射的计算模型,采用向前差分法求出了 UAV 蒙皮的一维导热微分方程,并在此基础上,结合 UAV 蒙皮材料的发射率,计算了在某一平面上 UAV 红外辐射强度的分布情况。计算结果表明:蒙皮在 8~14 μm 波段处红外辐射强度远大于 3~5 μm 波段的红外辐射强度;相同波段处,蒙皮正上方的辐射强度大于正下方的辐射强度。

关键词: 无人机; 环境辐射; 蒙皮温度; 发射率; 红外辐射强度

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0304001

Engineering calculation of infrared radiation of long-endurance UAV'skin

Huang Zhangbin¹, Li Xiaoxia^{1,2}, Guo Yuxiang¹, Ma Deyue¹, Zhao Liang¹

- (1. Electronic Engineering Institute, State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;
2. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: The skin infrared (IR) characteristics of a Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is the most important basis for the detection and recognition of the UAV. And the aerodynamic heating of an UAV's skin, the heat transfer by solar radiation and earth radiation are the key factors that are contribute to the skin IR characteristic of the UAV. The skin IR characteristics calculation model of an UAV was built based on the environment's infrared radiation and that of the UAV in this work. The one-dimensional heat conduction difference equation of the UAV skin was found out by a forward-difference method. And then, based on which, the IR radiation intensity distribution of the UAV in a certain plane was calculated by importing the skin emissivity of an UAV. Finally, it is concluded that the IR radiation intensity of an UAV at 8-14 μm band is far greater than that at 3-5 μm band. And at the same band, the radiation intensity of the top skin is higher than that of the bottom skin.

Key words: UAV; environmental radiation; skin temperature; emissivity; infrared radiation intensity

收稿日期:2016-07-10; 修订日期:2016-08-20

作者简介:黄章斌((1991-),男,硕士生,主要从事光电对抗方面的研究工作。Email:408867079@qq.com

导师简介:李晓霞(1969-),女,教授,博士生导师,主要从事光电对抗技术及材料方面的研究。Email:lxhong@163.com

0 引言

长航时无人机(UAV)的红外辐射特性是红外探测器对其进行识别与跟踪的基本依据,也是开展 UAV 红外隐身技术研究的基础。机身蒙皮是 UAV 主要的强红外辐射源之一,也是 8~14 μm 波段的主要红外辐射源。国外对 UAV 蒙皮辐射特征的理论研究开展较早,并研发了多种用于计算飞行器表面红外辐射特性的软件如,北约开发的 NIRATAM 软件,可用于空中红外目标的建模及其红外辐射特性的计算^[1];美国开发的 SIMIR 软件,可对目标进行精确的红外特征信号预估和全面的红外图像特征模拟;俄罗斯开发的 IRSAM 软件,主要可用于红外目标模型的建立与分析^[2]。

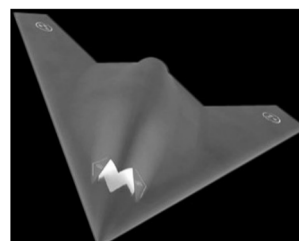
国内虽然起步较晚,但在相关领域也取得了一定的研究成果,如在数值计算方面,单勇^[3]运用逆向蒙特卡洛法的 FORTRAN 程序和大气衰减过程有机结合,对导弹蒙皮的红外辐射特性进行了计算;黄伟^[4]运用 fluent 软件计算得到了飞行器机体的温度场,在综合考虑了气动加热、发动机及排气喷流传热、蒙皮反射背景辐射的基础上,计算了探测器所接收目标的红外辐射;徐顶国^[5]采用将流场计算商业软件和自主开发红外计算软件相结合的形式,利用离散传递法计算了 UAV 蒙皮在 8~14 μm 波段红外辐射强度分布。工程计算方面,张海兴^[6]应用通用的工程算法计算了飞机的红外辐射,同时给出了计算步骤和计算公式并对计算结果可信度进行了分析;赵楠^[7]通过经验公式计算得到了飞机蒙皮的驻点温度,在此基础上结合飞机蒙皮投影面积以及红外辐射大气传输对接收端红外辐射强度的影响,计算得到了蒙皮的红外辐射特征;冯云松^[8]在综合考虑环境辐射和飞行器气动加热的条件下,通过建模、理论计算的方式,得到了特定飞行航迹下飞机的红外辐射强度。

文中将运用工程计算的方法,在综合考虑环境因素对 UAV 蒙皮辐射强度影响的基础上,结合 UAV 蒙皮自身辐射强度,计算出 UAV 蒙皮的温度以及红外辐射强度的分布状况。

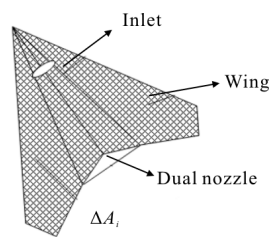
1 UAV 简化几何模型的建立

以国外某隐身 UAV 为研究对象,其实物图如

图 1(a)所示。该 UAV 采用飞翼布局、背部进气和单发涡扇动力的结构设计,其身長 9.5 m,翼展 12.5 m。根据该 UAV 实际尺寸的近似等效,建立简化的 UAV 模型,如图 1(b)所示。UAV 底面等效为简单平面多边形,机翼上表面等效为两个平面四边形,机身等效为三角锥。由于尾向辐射主要来自于尾喷口以及尾焰,文中将不计算尾喷管所在平面产生的辐射。因此,UAV 表面蒙皮辐射等效为底面多边形、机翼上表面的两个四边形以及三角锥的两个侧面的红外辐射,建立适当的坐标系,并对蒙皮表面进行网格划分,面元 ΔA_i 是面积为 10^{-4} m^2 的小矩形,网格数为 593 750,蒙皮上任意一点可由相应坐标表示出来。



(a) 国外某 UAV 实际图像
(a) Real UAV image



(b) UAV 简化模型图
(b) Simplified model of UAV

图 1 典型 UAV 几何外形示意图

Fig.1 Schematic diagram of a typical UAV geometry

2 UAV 蒙皮辐射分析

UAV 蒙皮辐射主要受到自身辐射及环境辐射两部分影响:自身辐射主要是 UAV 在飞行过程中蒙皮与空气摩擦所产生热量和发动机等内热源经热传导至蒙皮处热量的红外辐射;环境辐射的影响主要体现在 UAV 蒙皮对环境辐射的反射上,环境辐射主要包括太阳直接辐射、地球反照辐射(太阳辐射经地球反射后再投射到目标表面)、地球直接辐射(地球及其大气系统直接投射到目标表面辐射)。图 2 为 UAV 所受环境辐射影响示意图。

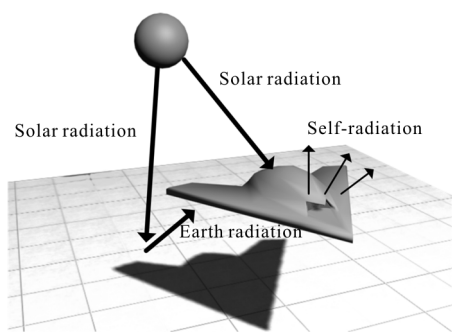


图 2 长航时 UAV 蒙皮受环境辐射影响

Fig.2 Long-endurance UAV skin affected by environmental radiation

2.1 气动加热计算

气动加热是指物体与空气或其他气体作高速相对运动时所产生的高温气体对物体的传热过程,全称是空气动力加热。UAV 在空中高速运动时,由于气流与其蒙皮面的强烈摩擦,在边界层内,气流损失的动能转化为热能,使边界层内气流温度上升,并对蒙皮面加热产生高温。在此过程中,蒙皮的恢复温度为:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot \gamma \cdot Ma^2 \right) \quad (1)$$

式中: T_0 为环境温度 (取值范围见表 1); k 为空气比热 (一般取 1.4); γ 为恢复温度系数; Ma 为飞行马赫数。其中 γ 是与目标几何外形有关的量,通常在 0.8~0.94 之间取值,当其取 1 时, T_r 即为驻点温度。表 1 为大气温度随高度的变化规律。

表 1 大气温度随高度的变化规律

Tab.1 Relation between atmospheric temperature and altitude

Height/m	Atmosphere	Temperature/K
$0 \leq H \leq 11\ 000$	Troposphere	$T_0 = 288.2 - 0.0065H$
$11\ 000 < H \leq 20\ 000$	Stratosphere	$T_0 = 216.7$
$20\ 000 < H \leq 32\ 000$	Stratosphere	$T_0 = 216.7 + 0.000\ 1 \times (H - 20\ 000)$

事实上,目标表面几何单元的取向对气动加热具有较为明显的影响。将来流分解为完全滞止分量和非滞止分量,完全滞止部分取驻点温度,非滞止部分取恢复温度,由此得到空间任意取向的面元表面温度计算公式^[9]:

$$T = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} (\gamma \cdot Ma_{//}^2 + Ma_{\perp}^2) \right] \quad (2)$$

2.2 对流换热影响

UAV 在高空飞行时,周边大气温度较低,气体对流换热对其蒙皮温度会造成较大影响,致使除驻点外的蒙皮温度较低。根据牛顿冷却公式可知,由边界外层传给单位面积蒙皮的热流密度 $Q_{Airflow}$ 为^[10]:

$$Q_{Airflow} = h \cdot (T_r - T_w) \quad (3)$$

式中: T_w 为蒙皮初始温度。

目标在高速运动中,高速气流对流换热系数 h 的计算公式为:

$$h = S_f \rho_{\delta} V_{\delta} c_p \quad (4)$$

$$S_f = (Pr)^{-2/3} \cdot \frac{C_f}{2} \quad (5)$$

式中: Pr 为普朗特数,对于空气 $Pr \approx 0.72$; c_f 为摩擦系数; ρ_{δ} 为边界层外边界气流密度; V_{δ} 为边界层外边界气流速度; c_p 为定压比热容。

2.3 背景红外辐射计算^[11]

2.3.1 太阳辐射

由于地球与太阳距离较远,可以认为太阳光是平行光,并且辐射强度是均匀的。记 Q_{Sun} 为面元 ΔA_i 接收到并吸收的太阳辐射,则可得以下两点^[9]:

(1) 对于高空目标

$$Q_{Sun} = \alpha_{Sun} S_0 F_{si} [1 + 0.033 \cos(360n/370)] \quad (6)$$

式中: α_{Sun} 为目标表面对太阳辐射的平均吸收率; S_0 为太阳常数,一般取 $1\ 353\ W/m^2$; F_{si} 为 ΔA_i 的太阳辐射角系数; n 为一年中的第几天,如春分时 $n=81$,夏至时 $n=174$ 。

(2) 对于低空和地面目标

考虑大气对太阳辐射传输的影响,在工程计算中,采用如下方法计算经过大气后目标吸收的太阳辐射为:

$$Q_{Sun} = \alpha_{Sun} S_0 [1 + 0.033 \cos(360n/370)] p_m^2 \quad (7)$$

式中: m 为大气质量数,其定义为大气对地球表面接收太阳光的影响程度,当太阳光入射光线与地面法线间的夹角为 θ 时,大气质量数为 $m = 1/\cos\theta$,文中计算时假设 $\theta=48.2^\circ$ 的典型晴天,即 $m=1.5$; p_2 为透过率,是光沿铅直方向由大气外界传播至某一高度的过程中,透过的光强占入射光强的比率,在下文计算中, p_2 的取值为 0.8。

2.3.2 地球辐射

地球对 UAV 辐射的影响包括地球直接辐射和

地球反照辐射,这两部分辐射经过大气传输,照射在 UAV 的表面。

地球本身可以等效为平均表面温度为 283 K、发射率为 0.9 的灰体,因此,地球直接辐射的辐射出射度为:

$$M_{\text{earth}} = \varepsilon_{\text{earth}} \cdot \sigma \cdot T^4 = 351.1 \text{ W/m}^2 \quad (8)$$

地球反照辐射与太阳在当地的辐射照度以及当地地表对太阳的平均反射率有关。其中,平均反射率可根据当地的地貌特征进行估算;太阳辐射照度则与太阳高度角、当地海平面高度以及天空中云霾与尘埃的含量有关。其计算较为复杂,可采用 LOWTRAN7 软件,根据不同的大气模式进行计算。在工程估算中,如果仅关心地表太阳总辐射照度,则可采用以下公式近似计算。

假设波长大于 0.9 μm 的太阳辐射主要被大气吸收,而波长小于 0.9 μm 的太阳辐射受瑞利散射的影响,无云时太阳在水平地面上的辐射照度 E_{s0} 为:

$$E_{s0} = [1 - A(U^*, \beta)](0.349E_0)\sin\beta + \left(\frac{1 - \rho_0}{1 - \rho_0 \cdot \rho_g}\right)(0.651E_0)\sin\beta \quad (9)$$

式中:0.349 E_0 为波长大于 0.9 μm 的太阳辐射量;0.651 E_0 为波长小于 0.9 μm 的太阳辐射量; $A(U^*, \beta)$ 为吸收系数; β 为太阳高度角; ρ_g 为平均地表反射率; ρ_0 为瑞利大气反射率,且有:

$$\rho_0 = 0.085 - 0.247 \lg\left(\frac{P_a}{P_0} \sin\beta\right) \quad (10)$$

式中: P_a 为近地面大气压,Pa; $P_0=100\ 000$ Pa。

太阳高度角 β 满足:

$$\sin\beta = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (11)$$

式中: ω 为时角; δ 为太阳赤纬; φ 为地理纬度。

吸收系数 $A(U^*, \beta)$ 为:

$$A(U^*, \beta) = 0.271 \lg\left(U^* \cdot \frac{1}{\sin\beta}\right) \quad (12)$$

式中: U^* 为大气等效水蒸气含量。

对于近地目标,地球可等效为无限大平板辐射源,所以 UAV 表面面元 ΔA_i 吸收来自地球的辐射 Q_{Earth} 为:

$$Q_{\text{Earth}} = M \cdot \Delta A_i = \alpha_0 \cdot (\alpha_{\text{earth}} \cdot E_{s0} + M_{\text{Earth}}) \cdot \Delta A_i \quad (13)$$

式中: α_0 为目标表面对地球辐射的平均吸收率; α_{earth} 为地球表面对太阳辐射的平均吸收率。

2.4 边界条件的确立

对于 UAV 蒙皮的外表面结构,温度场的基本方程可化简为无内热源的一维导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

式中: ρ 为密度; τ 为时间; c 为比热容; k 为导热系数。

边界条件是指导热物体的边界与外部环境之间在热交换方面进行的相互作用情况。结合前文所述,可得边界条件为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = Q_{\text{Sun}} + Q_{\text{Earth}} + Q_{\text{Airflow}} - Q_{\text{Radiation}} \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{Radiation}}$ 为蒙皮表面向外部空间辐射损失的能量,由斯蒂芬-玻耳兹曼定律可得:

$$Q_{\text{Radiation}} = \varepsilon_{\text{skin}} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (16)$$

式中: $\varepsilon_{\text{skin}}$ 为蒙皮表面发射率。

2.5 蒙皮温度的计算与结果

2.5.1 计算过程

假设蒙皮厚度为 L ,并将其从内至外划分为 n 个薄层,则薄层厚度为 $\Delta l = L/n$,同时,令计算时间为 $t = m \times \Delta \tau$, $m=0,1,2,3 \dots$,则 t 时刻第 i 个薄层的中心温度可表示为 $T(m,i)$,如图 3 所示。

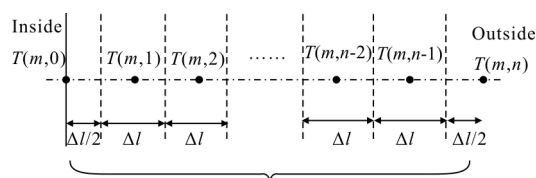


图 3 蒙皮导热空间区域划分与节点示意图

Fig.3 Schematic diagram of space division of skin thermal conductivity and nodes

对于导热微分方程,利用向前差分格式得出内节点方程为:

$$\rho c \frac{T(m,i) - T(m-1,i)}{\Delta \tau} = k \frac{T(m,i+1) + T(m,i-1) - 2T(m,i)}{(\Delta l)^2} \quad (17)$$

根据能量守恒的观点,可以推导出外边界节点的节点方程为:

$$\rho c \frac{T(m,n) - T(m-1,n)}{\Delta \tau} \cdot \frac{\Delta l}{2} = k \frac{T(m,n-1) - T(m,n)}{\Delta l} + Q_{\text{Sun}}^m + Q_{\text{Earth}}^m + Q_{\text{Airflow}}^m - Q_{\text{Radiation}}^m \quad (18)$$

对于初始条件,可以认为蒙皮温度沿厚度方向

近似成线性分布,即:

$$T(0,i)=T^2+i \cdot \frac{T_1-T_2}{n} \quad (19)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为内表面和外表面的初始温度值。

将所有节点的差分方程联立进行迭代求解,则可求得外表面任意时刻的温度 $T(m,n)$ 。

2.5.2 计算结果与分析

假设无人机表面材料均采用石墨/双马来酰亚胺复合材料 IM7/5250-4^[12],其物理参数如表 2 所示。为研究方便,假设 UAV 在飞行过程中,其纬度位置不发生变化,航行轨迹为从坐标点 (N30°, E120°)处飞向坐标点(N30°, E105°);飞行速度为 $v=0.8 \text{ Ma}$,且为匀速飞行;飞行高度为 12 km。

表 2 石墨双马来酰亚胺复合材料 IM7/5250-4 参数

Tab.2 Diaacid imide IM7/5250-4 graphite composite material parameters

Physical parameters	Value
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.55×10^3
Specific heat/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 250
Thermal conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.85
Emissivity	0.9

按照前文所建模型以及计算方法,可算得 UAV 表面温度随时间的变化情况,如图 4 所示。图中实线为机翼上表面温度随时间变化曲线,点线为机身上表面温度随时间变化曲线,虚线为机身及机翼下表面温度随时间变化曲线。由图可知,随着 UAV 飞行时间的增加,其蒙皮温度逐渐上升,而温度的增长速率逐渐减小,在一段时间以后,温度基本趋于稳定,如机翼上表面温度基本维持在 253 K 左右。这是因为飞机在起飞阶段,由于蒙皮与空气摩擦生热,太阳以及地球辐射等因素,使得其蒙皮温度上升较快,加上 UAV 自身辐射,当各种热交换趋于动态平衡时,蒙皮温度不再升高,逐渐趋于某一稳定值;蒙皮下表面的温度要低于蒙皮上表面温度,其最终温度保持在 230 K 左右,这是因为蒙皮下表面接收太阳直接辐射较少,而受到地球辐射较多,经过前文的计算可知,太阳辐射量 $Q_{\text{Sun}}=899.2 \text{ J}$,而地球辐射量 $Q_{\text{Earth}}=545.7 \text{ J}$,因此太阳辐射对蒙皮温度的影响较大;机翼上表

面温度要大于机身上表面温度,这是因为在相同条件下,机翼上表面的太阳高度角要大于机身上表面的太阳高度角,由前文内容可知,当太阳高度角较大时,其接收到太阳直接辐射和地球对太阳辐射的反射量都较大。

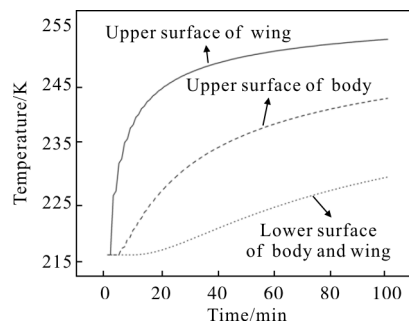


图 4 蒙皮温度随时间变化曲线

Fig.4 Dependence of skin temperature on time

为了进一步直观描述蒙皮的温度分布,图 5 示出了不同时刻、不同蒙皮厚度处的温度分布情况。可以看出:蒙皮从内表面至外表面温度逐渐上升,同时随着飞行时间的增加,所有厚度处的蒙皮温度都在上升,最后,均逐渐趋于某个固定的温度值。

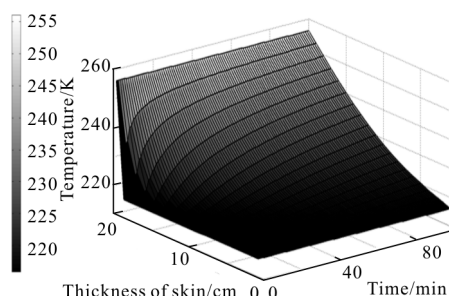


图 5 蒙皮温度随厚度和时间的分布情况

Fig.5 Skin temperature at different thicknesses and time

3 UAV 蒙皮红外辐射计算与分析

3.1 UAV 自身辐射量

在求得 UAV 蒙皮温度的基础上,根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律,求出该温度下黑体的全辐射出射度:

$$M_{\text{bb}}=\sigma \cdot T^4 \quad (20)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; T 为 UAV 表面温度, K。

假设 UAV 表面的微元为漫反射体,根据朗伯源的性质可得出辐射出射度与辐射强度 ΔI_s 的关系如下:

$$\Delta I_s = F_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \varepsilon_{\text{Skin}} \cdot \frac{M_{bb}}{\pi} \Delta A \cos \theta_i \quad (21)$$

式中： λ_1, λ_2 为所求波段上下限波长， μm ； $\varepsilon_{\text{Skin}}$ 为 UAV 表面发射率； ΔA 为 UAV 表面的微元面积； θ 为微元表面法向与辐射强度方向的夹角； $F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为辐射效率，其值可查阅黑体函数表得到。

3.2 UAV 对环境辐射的反射

UAV 表面所接收到环境辐射的照度 E 为：

$$E = E_{\text{Sun}} + (E_{\text{S0}}\rho_0 + E_{\text{Earth}}) \cdot F_{\text{Earth}} \quad (22)$$

式中： E_{Sun} 为太阳在 UAV 表面的辐射照度； ρ_0 为平均地表反射系数； F_{Earth} 为地面与 UAV 表面所成角系数。

若 UAV 表面发射率为 $\varepsilon_{\text{Skin}}$ ，则其对环境辐射的反射量 M_r 为：

$$M_r = (1 - \varepsilon_{\text{Skin}}) \cdot E = (1 - \varepsilon_{\text{Skin}}) \cdot [E_{\text{Sun}} + (E_{\text{S0}} + E_{\text{Earth}}) \cdot F_{\text{Earth}}] \quad (23)$$

$$\Delta I_r = F_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \frac{M_r}{\pi} \Delta A \cos \theta_i \quad (24)$$

综上，单个面元的红外辐射强度为：

$$\Delta I = \Delta I_s + \Delta I_r \quad (25)$$

蒙皮的红外辐射强度为：

$$I = \sum \Delta I_i \quad (26)$$

3.3 计算结果及分析

假设在飞机的周围放置红外探测器，定义其正前方、正上方、正后方、正下方分别对应 $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ，如图 6 所示。

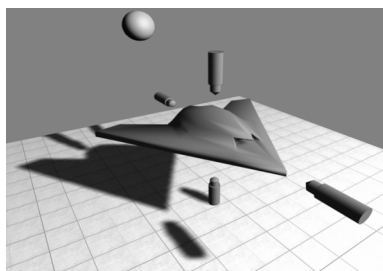


图 6 红外探测 UAV 的示意图

Fig.6 Schematic diagram of infrared detection for an UAV

根据前文所得蒙皮温度以及蒙皮辐射强度的计算公式，可得蒙皮的红外辐射强度在所探测平面内的分布情况。图 7、8 分别表示在 3~5、8~14 μm 红外大气窗口处，UAV 蒙皮红外辐射强度的分布。从图中可以得知：蒙皮在 8~14 μm 波段的红外辐射强度

要大于其在 3~5 μm 波段的红外辐射强度，而无论是 3~5 μm 还是 8~14 μm 波段，UAV 蒙皮辐射强度在垂直于机身方向上最大，平行于机身的方向上最小。这是因为垂直于机身方向上蒙皮的投影面积最大，且当探测方向随着水平方向的移动，其投影面积逐渐减小；相同波段处，正上方的辐射强度大于正下方的辐射强度，主要是因为正上方蒙皮温度高于正下方蒙皮温度，并且处于正下方的蒙皮对太阳辐射的反射量也非常小；同时，蒙皮机头方向的红外辐射强度略大于机尾方向的红外辐射强度，这是因为文中只计算蒙皮的红外辐射强度，在计算过程中没有加入尾焰及尾喷管对蒙皮整体红外辐射强度分布的影响。

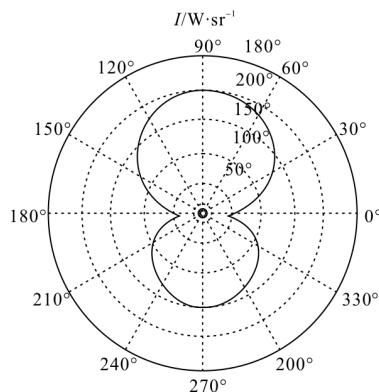


图 7 UAV 蒙皮在 3~5 μm 波段的辐射强度分布

Fig.7 Radiation intensity distribution of an UAV skin at 3~5 μm

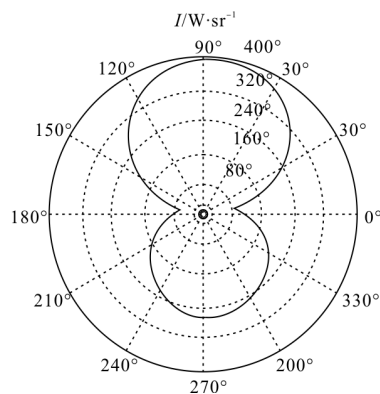


图 8 UAV 蒙皮在 8~14 μm 波段的辐射强度分布

Fig.8 Radiation intensity distribution of an UAV skin at 8~14 μm

3.4 结果验证

通过建立模型所计算得到的 UAV 蒙皮在不同波段的红外辐射强度数值与参考文献[6]表 2 中计算结果一致，且辐射强度的结论与参考文献[4]一致，计算模型和结果符合实际情况，说明计算模型的

正确性以及计算结果的可信性。

4 结论

文中建立了 UAV 红外计算模型,并以国外某型 UAV 为例,综合 UAV 蒙皮的气动加热、太阳辐射换热以及地球辐射换热等因素,计算了特定条件下 UAV 表面的温度场分布,随后结合 UAV 表面材料的发射率,计算了 UAV 蒙皮在某一平面上的红外辐射强度分布情况,并得到以下结论。

(1) UAV 蒙皮在 8~14 μm 波段处的红外辐射强度要远大于其在 3~5 μm 波段处的红外辐射强度,因此对 UAV 的探测,应选用波段较大的红外探测器。

(2) UAV 蒙皮辐射强度在垂直于机身方向上最大,水平方向最小,因此,对 UAV 进行红外探测时,应尽量使探测器与机身保持较大的锐角。

相同波段处,蒙皮正上方的辐射强度大于正下方的辐射强度,可以选择空中预警探测的方式达到对 UAV 更好的探测效果。

参考文献:

- [1] Bakker E J, Fair M L, Schleijsen H M A. Modeling multispectral imagery data with NIRATAM v3.1 and NPLUME v1.6 [C]//Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 1999, 3699: 80-91.
- [2] Watkins W R. Thermal background modeling and its use in science and technology [C]//Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 1992, 1687: 84-106.
- [3] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Guo Rongwei. Numerical computation and analysis of the infrared radiation characteristic of missile scarfskin [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 251-255.
单勇, 张靖周, 郭荣伟. 导弹蒙皮红外辐射特性的数值计算与分析[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(2): 251-255.
- [4] Huang Wei, Ji Honghu. Effect of reflected background radiation by skin on infrared signature of subsonic aircraft (I): methodology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1699-1703. (in Chinese)
黄伟, 吉洪湖. 蒙皮反射的背景辐射对亚声速飞机红外特征的影响研究(一):方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1699-1703.
- [5] Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Study on the infrared radiation characteristics of UAVS' skin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 880-884. (in Chinese)
徐顶国, 桑建华, 罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 880-884.
- [6] Zhang Haixing, Yue Min. Theoretical calculation of the IR radiation of an aeroplane [J]. *Journal of Xidian University*, 1997(1): 78-81. (in Chinese)
张海兴, 岳敏. 飞机红外辐射的理论计算 [J]. *西安电子科技大学学报*, 1997(1): 78-81.
- [7] Zhao Nan, Li Xiaoxia, Ma Sen, et al. Research of infrared radiation and atmospheric transmittance of an incoming airplane[J]. *Laser Infrared*, 2012, 42(8): 890-893. (in Chinese)
赵楠, 李晓霞, 马森, 等. 来袭飞机的红外辐射及其大气传输特性研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(8): 890-893.
- [8] Feng Yunsong, Lv Xiangyin, Ling Yongshun, et al. Theoretical calculation on infrared radiation of air target scarfskin [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(2): 155-122 (in Chinese)
冯云松, 吕相银, 凌永顺, 等. 空中目标蒙皮红外辐射特性的理论计算[J]. *光电工程*, 2013, 40(2): 115-122.
- [9] Ma Sen. IR characteristic simulation and dynamic simulation software development of aerial target [D]. Hefei: Electronic Engineering Institute, 2012. (in Chinese)
马森. 空中来袭目标 IR 特性仿真及动态模拟软件开发[D].合肥: 电子工程学院, 2012.
- [10] Xuan Yimin. Infrared Characteristics of Ground Targets and Backgrounds [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
宣益民. 地面目标与背景的红外特征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [11] Zhang Jianqi. Infrared Physics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013.
张建奇. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [12] Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook [S]. Beijing:China Standard Press, 2002: 146-150.
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 146-150.