

## 发射率对飞机蒙皮温度及红外辐射特性的影响

冯云松<sup>1,2</sup>, 路 远<sup>1,2</sup>, 凌永顺<sup>1,2</sup>

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 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:** 建立了某型飞机的简化几何模型, 并设置了飞机的飞行航迹。综合考虑了太阳辐射、地球辐射、大气辐射和气动加热的多种因素, 结合飞机蒙皮材料物理特性, 针对涂覆三种不同发射率的隐身涂层蒙皮建立了导热物理模型, 采用一维导热方程计算了飞机在 12:00~12:45 时间段飞行时不同发射率的蒙皮表面的温度分布。最后综合考虑了环境辐射的影响, 分别对具有不同发射率的飞机蒙皮 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  两个波段的红外辐射强度进行了数值计算。结果表明: 随着蒙皮发射率的减小, 在一定程度上能降低蒙皮在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外辐射强度, 但是因环境因素的影响, 仅仅通过降低蒙皮发射率, 飞机红外隐身的效果并不理想。

**关键词:** 飞机蒙皮; 发射率; 温度; 红外辐射

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)02-0294-06

## Influence of surface emissivity on temperature and infrared radiation characteristics of aircraft skin

Feng Yunsong<sup>1,2</sup>, Lu Yuan<sup>1,2</sup>, Ling Yongshun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;  
2. Key Lab of IR and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Predigesting geometrical model of a certain aircraft was established, and its flight path was set. Aerodynamic heating and radiation from sun, ground and atmosphere were considered comprehensively, then physical models of heat conduction were founded against three shielding coatings with different emissivity and physical characteristic of stealth aircraft skin. Based on one dimensional heat conduction equation, temperature distributions of skins with different emissivity were calculated between 12:00 pm and 12:45 pm. Finally, influence of environment radiation was considered, the infrared radiant intensity distributions of skins with different emissivity were calculated numerically in 3-5  $\mu\text{m}$  and 8-14  $\mu\text{m}$ . The result improves that with skin emissivity reducing the infrared radiant intensity of skin diminishes at a certain extent, but due to influence of environment radiation, the effect of aircraft infrared stealth is not ideal only by skin emissivity decreasing.

**Key words:** aircraft skin; emissivity; temperature; infrared radiation

收稿日期: 2012-06-23; 修订日期: 2012-07-21

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室创新基金(2011B0622)

作者简介: 冯云松(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事目标红外特性方面的研究。Email: fyseei@163.com

## 0 引言

随着红外探测与制导技术的飞速发展,对飞机红外隐身技术的研究已得到世界各国的高度重视,其中低发射率红外隐身涂料是当今红外隐身技术中较为活跃的研究领域。何超<sup>[1]</sup>等研究了低发射率涂层对地面薄板温度的影响,冉洪武<sup>[2]</sup>等对不同发射率的红外隐身涂层在典型背景中的伪装效率进行了研究,吉洪湖<sup>[3]</sup>等对采用低发射率涂层的发动排气系统红外特征进行了实验研究。但以往的研究较多注重实验测量或者是脱离环境因素进行计算模拟,关于在一定环境下发射率对飞机蒙皮红外特征的影响缺乏系统的研究,因此,有必要对其进行理论建模和数值研究。

文中在考虑了环境因素的基础上,针对某型飞机,计算了其在一定环境下飞行时具有不同发射率涂层的蒙皮表面的温度分布和其在不同蒙皮表面发射率情况下的红外辐射强度分布。

## 1 蒙皮材料及其隐身涂层

某型隐身飞机所有外表面蒙皮采用的双马树脂复合材料是石墨双马来酰亚胺复合材料 IM7/5250-4,其物性参数如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 双马复合材料 IM7/5250-4 物性参数  
Tab.1 Physical parameters of the composite IM7/5250-4

Parameter	Value
Density $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$1.55 \times 10^3$
Heat capacity $c / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1 250
Thermal diffusivity $a / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$0.44 \times 10^{-6}$
Heat transfer coefficient $k / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.85

红外隐身涂料工艺简单,品种较多,表 2 给出了几种应用于隐身飞机蒙皮涂层的隐身材料及其发射率<sup>[5-6]</sup>,并且假设蒙皮表面为朗伯灰体表面。

表 2 几种涂层材料及发射率  
Tab.2 Material and emissivity of several coatings

No.	Material	Emissivity
1#	Aluminum foil(38, $\Phi 70 \mu\text{m}$ ), inorganic phosphate binder	0.18
2#	Aluminum foil(10-20, $\Phi 10 \mu\text{m}$ ), polyurethane, carbon black	0.5
3#	4% aluminum powder, phenolic resin	0.9

## 2 计算模型

### 2.1 飞机几何模型

根据某型隐身飞机的实际尺寸近似等效并建立简化的飞机模型<sup>[7]</sup>,其长度、宽度和高度分别为  $l=18.92 \text{ m}$ ,  $w=11.77 \text{ m}$ ,  $h=3.36 \text{ m}$ ,如图 1 所示,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别代表模型 A(EFH 面)、B(EGH 面)、C(EFG 面)、D(FGH 面)4 个面的单位法线矢量,  $E$  代表机头位置,笛卡尔坐标系原点位于模型底面对称线的中心位置  $O$  处。

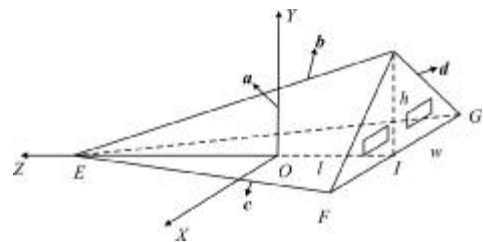


图 1 飞机简化几何模型

Fig.1 Predigesting geometrical model of aircraft

### 2.2 航迹设置

假设飞机在北纬  $30^\circ$  的同一纬度上飞行,并且只研究飞机在某一段航线上的红外辐射特性,该段航线的起点  $M$  为  $(N30^\circ, E120^\circ)$ ,终点  $N$  为  $(N30^\circ, E105^\circ)$ ,飞机处于平飞匀速巡航状态,飞行速度  $v=15 \text{ Ma}$ ,飞行高度  $h=3 \text{ km}$ ,如图 2 所示。

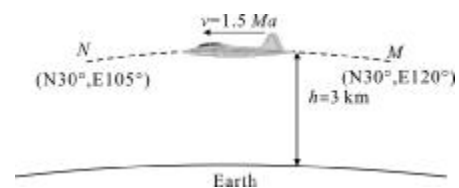


图 2 飞机飞行轨迹

Fig.2 Flight path of stealth aircraft

## 3 蒙皮辐射换热因素

飞机表面近似划分为 4 个三角形平面,由于文中只研究蒙皮温度及辐射,并且尾向辐射主要来自尾喷管和尾焰,所以忽略模型 D 面的辐射。构成每个蒙皮平面热平衡的能量主要包括太阳辐射  $Q_{\text{sun}}$ 、地球辐射  $Q_{\text{ground}}$ 、天空辐射  $Q_{\text{sky}}$ 、大气对蒙皮的气动加热  $Q_{\text{aerod}}$ 、蒙皮外表面的热辐射  $Q_{\text{self}}$  以及内部换热  $Q_{\text{inner}}$ <sup>[8]</sup>,如图 3 所示。

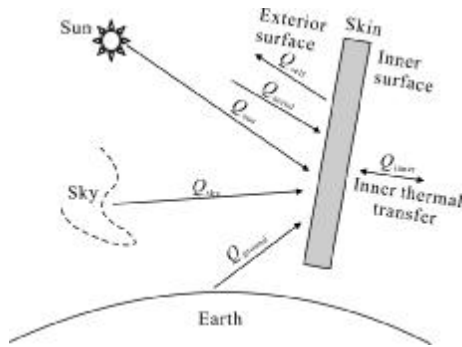


图 3 蒙皮热交换示意图

Fig.3 Sketch map of scarf skin heat transfer

### 3.1 蒙皮自身辐射

蒙皮表面向外部空间辐射损失的能流密度可由斯蒂芬-波耳兹曼定律得到:

$$Q_{self} = \epsilon_{skin} \sigma T_{skin}^4 \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{skin}$  为蒙皮外表面的发射率;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻耳兹曼常数;  $T_{skin}$  为蒙皮外表面的温度。

### 3.2 太阳辐射

蒙皮表面接收到的太阳辐射的总照度包括太阳的直接照射  $E_{sundir}$ 、地球对太阳辐射的反射  $E_{sunref}$  和大气对太阳辐射的散射  $E_{sundis}$ , 因此, 蒙皮接收到的太阳辐射的总照度为:

$$E_{sun} = E_{sundir} + E_{sundis} + E_{sunref} \quad (2)$$

所以目标表面接收到的太阳辐射热流为:

$$Q_{sun} = \alpha_{ski}^{aver} n E_{sun} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_{ski}^{aver}$  为蒙皮对太阳辐射的吸收率。

### 3.3 地面辐射

地面的辐射出射度为  $E_{ground}$ , 则飞机每个表面接收到地面的辐射热流为:

$$Q_{ground} = \alpha_{skin}^{ground} E_{ground} F_{ground-j} \quad (4)$$

式中:  $F_{ground-j}$  为飞机各表面对地面辐射的角系数;

$\alpha_{skin}^{ground}$  为蒙皮对地球辐射的吸收率。

### 3.4 大气辐射

飞机外表面接收到的大气辐射照度由大气的直接辐射和大气辐射  $E_{skv}$  经地球反射辐射  $\rho_{ground} E_{skv}$  两部分组成, 则飞机每个表面接收到大气的辐射热流为:

$$Q_{sky} = \alpha_{skin} (E_{sky} F_{sky-j} + \rho_{ground} E_{sky} F_{ground-j}) \quad (5)$$

式中:  $F_{sky-j}$  为飞机各表面对大气辐射的角系数;

$\rho_{ground}$  为地球的反射率。

### 3.5 气动加热

根据气动加热理论, 附面层传给单位面积蒙皮的热流密度  $Q_{aerod}$  为<sup>[9]</sup>:

$$Q_{aerod} = h_r (T_r - T_w) \quad (6)$$

其中, 热交换系数  $h_r = (\text{Pr})^{-2/3} \frac{c_f}{2} c_p \rho_{\infty} V_{\infty}$ ; 恢复温度

$T_r = T_{\infty} (1 + \sqrt{\text{Pr}} \frac{\gamma - 1}{2} M_{\infty}^2)$ 。式中:  $T_w$  为蒙皮表面温度;  $\text{Pr}$

为普朗特数, 对于空气  $\text{Pr} \approx 0.72$ ;  $c_f$  为摩擦系数;  $c_p$  为定压比热;  $\rho_{\infty}$  为来流密度;  $V_{\infty}$  为来流速度;  $T_{\infty}$  为来流温度;  $\gamma$  为空气的定压热容量和定容热容量之比, 通常取 1.3;  $M_{\infty}$  为飞行器飞行马赫数。

## 4 蒙皮温度场

### 4.1 导热微分方程

对于飞机蒙皮的外表面结构, 温度场的基本方程可简化为无内热源的一维导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容;  $\tau$  为时间;  $k$  为导热系数。

### 4.2 边界条件的确立

由前文蒙皮表面与外界环境热量交换的分析, 可以得到外边界条件为:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{outer} = Q_{sun} + Q_{ground} + Q_{sky} + Q_{aerod} - Q_{self} \quad (8)$$

式中:  $r$  为边界面某处的外法线方向。

对于蒙皮的内边界, 由于其内部空调等设备的控温调节措施, 通常可认为内壁的温度近似保持不变, 即

$$T|_{inner} = T_0 \quad (9)$$

### 4.3 蒙皮温度数值计算与结果

#### 4.3.1 数值计算

用数值方法求解导热问题, 首先要将求解区域离散化。对于飞机蒙皮, 可将其从外向内分为  $n$  个薄层, 设总厚度为  $X$ , 则薄层厚度为  $\Delta x = X/n$ , 若同时令计算时间  $t = m\Delta\tau$ ,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ , 则  $t$  时刻第  $i$  个薄层的中心温度可表示为  $T(m, i)$ , 如图 4 所示。

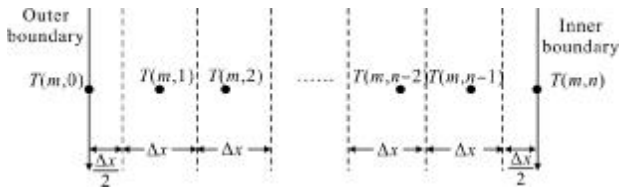


图 4 一维导热空间区域划分与节点示意图

Fig.4 Partitions and nodes of one dimensional heat conduction

对于蒙皮内部节点,利用向后差分格式,离散结果为:

$$\rho c = \frac{T(m+1,i) - T(m,i)}{\Delta \tau} = k \frac{T(m+1,i+1) + T(m+1,i-1) - 2T(m+1,i)}{(\Delta x)^2} \quad (10)$$

而外边界节点方程的隐式格式为:

$$\rho c = \frac{T(m+1,0) - T(m,0)}{\Delta \tau} \frac{\Delta x}{2} = k \frac{T(m+1,1) - T(m+1,0)}{\Delta x} + Q_{sun}^{m+1} + Q_{ground}^{m+1} + Q_{sky}^{m+1} + Q_{aerod}^{m+1} - Q_{self}^{m+1} \quad (11)$$

对于初始条件,此时可认为蒙皮温度沿厚度方向近似成线性分布,即

$$T(0,i) = T_2 + i \frac{T_1 - T_2}{n} \quad (i=0,1,2,\dots,n) \quad (12)$$

式中:  $T_1$  和  $T_2$  分别为内表面和外表面的初始温度值。

利用隐式格式,将所有节点的差分方程联立进行迭代求解,可得蒙皮外表面在任意时间节点的温度  $T(m,0)$ 。

### 4.3.2 数值计算结果与分析

计算条件为:在 2011 年 12 月 1 日中午 12:00, ( $N30^\circ, E120^\circ$ ) 地表温度为 281.4 K, 计算三种不同蒙皮发射率情形下飞机在中午 12:00 这一时刻经过 ( $N30^\circ, E120^\circ$ ) 这一点, 沿着纬度为  $30^\circ$  的纬线向西飞行(飞行轨迹如图 2 所示)。

根据前文所建模型和 4.3.1 的数值计算方法,得到飞机模型的 A、B、C 3 个面在不同蒙皮发射率下的温度变化曲线,如图 5 所示。其中,图 5(a)为飞机在中午 12:00~12:45 时间段飞行时的模型 A 面温度变化曲线,由图可知,涂覆发射率高的涂料时温度较高,这是由于发射率高的涂层吸收率也高,并且模型 A 面在中午正受到阳光的照射,从而造成 A 面发射率高时温度也高;图 5(b)和(c)分别为同样时间段内模型 B 面和 C 面的温度变化曲线,由图可知,涂覆发射率低的涂料时温度较高,这是由于发射率低的

涂层自身辐射出的能量相对较少,并且模型 B 面和 C 面在飞行时间段未能受到阳光的照射,从而造成发射率低时温度反而较高。但不论在何种发射率下,蒙皮温度均随着环境温度升高而缓慢升高,并且 A 面温度要高于其他两面的温度,这是由于 A 面受到阳光照射的缘故,C 面由于受到地球辐射和太阳经地球反射辐射的影响,导致 C 面温度略高于 B 面。

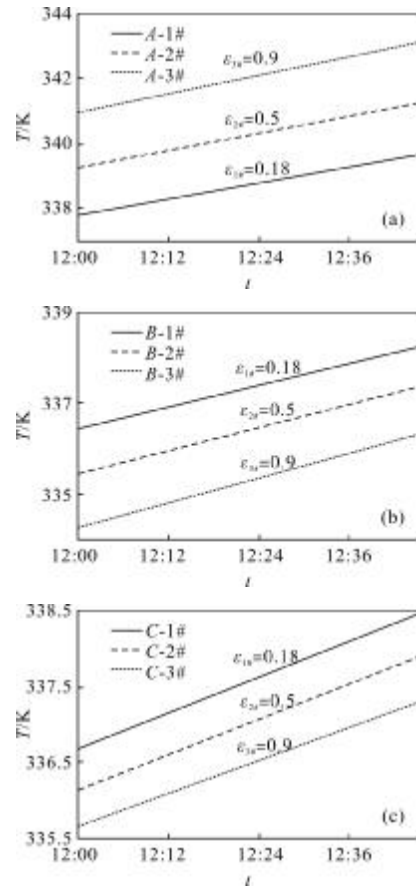


图 5 中午 12:00-12:45 在不同发射率下模型蒙皮温度变化曲线

Fig.5 Curves of skin temperature between 12:00 pm and 12:45 pm with different emissivity

## 5 红外辐射计算结果与分析

### 5.1 蒙皮红外辐射计算

在白天,模型任一蒙皮平面接收到的环境红外辐射照度为:

$$E_{bg-j}^{\Delta \lambda} = E_{sun}^{\Delta \lambda} + E_{ground}^{\Delta \lambda} F_{ground-j} + E_{sky}^{\Delta \lambda} F_{sky-j} + \rho_{ground} E_{sky}^{\Delta \lambda} F_{ground-j} \quad (13)$$

则蒙皮反射的环境辐射为:

$$M_{ref-j}^{\Delta \lambda} = \rho_{skin} E_{bg-j}^{\Delta \lambda} \quad (14)$$

式中:  $\rho_{skin}$  为蒙皮的反射率,则有  $\rho_{skin} = 1 - \epsilon_{skin}$ 。因此,

任一蒙皮在某一  $\theta$  方向上因反射环境辐射的红外辐射强度可以表示为:

$$I_{\text{ref-j}}^{\Delta\lambda} = \frac{M_{\text{ref-j}}^{\Delta\lambda}}{\pi} \cos\theta A_j = \frac{\rho_{\text{skin}} \cdot E_{\text{bg-j}}^{\Delta\lambda} \cdot A_j \cdot \cos\theta}{\pi} \quad (15)$$

任一蒙皮在某一方向上自身辐射的红外辐射强度可以表示为:

$$I_{\text{self-j}}^{\Delta\lambda} = \frac{M_{\text{self-j}}^{\Delta\lambda}}{\pi} A_j \cos\theta \quad (16)$$

因此,任一蒙皮在某一  $\theta$  方向上红外辐射总强度为:

$$I_{\theta-j}^{\Delta\lambda} = I_{\text{ref-j}}^{\Delta\lambda} + I_{\text{self-j}}^{\Delta\lambda} = \frac{\cos\theta}{\pi} \cdot A_j (\rho_{\text{skin}} E_{\text{bg-j}}^{\Delta\lambda} + M_{\text{self-j}}^{\Delta\lambda}) \quad (17)$$

飞机模型的 A, B, C 3 个面的法线方向分别为  $\vec{r}_A$ ,  $\vec{r}_B$ ,  $\vec{r}_C$ , 探测方向为  $\vec{r}_\theta$ , 则整个飞机蒙皮在 XOY 截面内随  $\theta$  变化的强度分布为:

$$I_\theta^{\Delta\lambda} = \sum_{j=ABC} I_{\theta-j}^{\Delta\lambda} \max[\vec{r}_j \cdot \vec{r}_\theta, 0] \quad (18)$$

以上公式推导中,上标为  $\Delta\lambda$  的变量均为波段量,对中远红外分别计算即可得到 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  的红外辐射强度分布。

## 5.2 红外辐射计算结果与分析

图 6 为在 12:17 这一时刻飞机蒙皮具有不同发射率情形下在 8~14  $\mu\text{m}$  和 3~5  $\mu\text{m}$  两个波段的红外辐射强度分布图(在 XOY 平面内)。由图可知,飞机蒙皮在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度远大于在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度,但不论 3~5  $\mu\text{m}$  还是 8~14  $\mu\text{m}$ ,飞机蒙皮辐射在垂直方向的红外辐射强度最大,在水平方向的红外辐射强度最小,这主要因为垂直方向飞机投影面积最大,而水平方向飞机投影面积最小。随着蒙皮涂层发射率的减小,在 8~14  $\mu\text{m}$  波

段,飞机蒙皮辐射有所降低,在垂直上方,红外辐射强度由 9930 W/sr 降低到 4316 W/sr,降低了 56.5%,在垂直下方红外辐射强度由 9787 W/sr 降低到 8193 W/sr,降低了 17.4%,造成上下方降低幅度不同原因是飞机下表面面对地球长波辐射的反射因发射率不同而不同;因为飞机蒙皮以及环境辐射的大部分能量都集中在 8~14  $\mu\text{m}$ ,所以 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外辐射强度随着发射率变化不大,而且在这一波段红外辐射强度并不对称,这主要是由于阳光只照射模型 A 面的缘故。

## 6 结论

文中计算了飞机在 12:00~12:45 时间段在不同发射率情况下蒙皮表面的温度分布,并且选择某一时刻计算了飞机蒙皮中远红外两个波段的辐射强度分布,最终的模拟计算结果与参考文献[10-11]所得实验和仿真结果相吻合,证实了模型建立的合理性与数值计算结果的有效性。并由结果分析,初步得出以下结论:

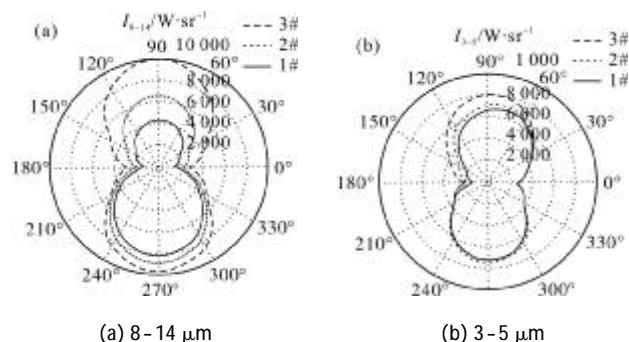
(1) 飞机飞行过程中蒙皮温度变化较小,随着蒙皮发射率的改变,温度也将有所变化,但是这将由发射率和环境因素共同决定。

(2) 蒙皮发射率的变化对飞机 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外辐射影响较小,而在 8~14  $\mu\text{m}$  波段,随着蒙皮发射率的减小,飞机蒙皮的红外辐射有所降低,但是具体降低幅度与环境因素有关。

(3) 飞机蒙皮在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度是在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度 10 倍以上,蒙皮热辐射能量主要集中在远红外波段,因此采用远红外探测器更有利于探测飞机。

## 参考文献:

- [1] He Chao, Lv Xuliang, Wang Yongjie, et al. Thermal simulation of low emissivity painting layer's impact on target [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 73-75. (in Chinese) 何超,吕绪良,王永杰,等. 低发射率涂层对目标温度影响的数值模拟[J]. *红外技术*, 2010, 32(2): 73-75.
- [2] Ran Hongwu, Zhou Xuemei, Cao Hongjin, et al. Research on camouflage efficiency of IR stealth coatings with different emissivity at typical background [J]. *Surface Technology*, 2009, 38(5): 63-66. (in Chinese) 冉洪武,周学梅,曹红锦,等. 不同发射率红外隐身涂层



(a) 8~14  $\mu\text{m}$

(b) 3~5  $\mu\text{m}$

图 6 不同发射率下蒙皮红外辐射强度分布

Fig.6 Infrared radiant intensity distributions of skins with different emissivity

- 在典型背景中的伪装效率研究 [J]. 表面技术, 2009, 38 (5): 63-66.
- [3] Chen Jun, Ji Honghu, Si Ren, et al. Experiment of IR suppression for nozzle with low infrared emissivity coating [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33 (7): 395-400. (in Chinese)  
陈俊, 吉洪湖, 斯仁, 等. 采用低发射率涂层的发动排气系统红外特征实验 [J]. 红外技术, 2011, 33(7): 395-400.
- [4] Editor Committee of "Chinese Aerial Material Handbook". Chinese Aerial Material Handbook [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 2002: 146-150. (in Chinese)  
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 146-150.
- [5] Hu Chuanxin. Technology of Shielding Coating [M]. Beijing: Chemic Industry Press, 2004: 149-151. (in Chinese)  
胡传忻. 隐身涂层技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 149-151.
- [6] Xing Honglong, Ma Yan, He Liang, et al. Low infrared emissivity fabric coating with P (IP-co-AN) adhesive at spectral range of 8-14 $\mu\text{m}$  [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2349-2353. (in Chinese)  
邢宏龙, 马妍, 何亮, 等. 聚异戊二烯/丙烯酸基织物涂层在 8-14  $\mu\text{m}$  波段的红外低发射率 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2349-2353.
- [7] Wei Gang. F-22 Accipiter Fighter Plane [M]. Beijing: Publishing House of Aeronautic Industry, 2008: 5-8, 80-81. (in Chinese)  
魏钢. F-22 “猛禽” 战斗机 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 5-8, 80-81.
- [8] Wu Xiaodi, Huang Chaochao, Ling Yongshun, et al. Surface temperature and infrared feature of a satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 805-810. (in Chinese)  
吴晓迪, 黄超超, 凌永顺, 等. 卫星的表面温度与红外辐射特性 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 805-810.
- [9] Fan Liqin, Zhou Dingyi. Aeroplane Aerodynamics [M]. Xi'an: Northwest Industry University Press, 1989: 110-117. (in Chinese)  
范立钦, 周鼎义. 飞机空气动力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989: 110-117.
- [10] Liu Juan, Gong Guanghong, Han Liang, et al. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209-1213. (in Chinese)  
刘娟, 龚光红, 韩亮, 等. 飞机红外辐射特性建模与仿真 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1209-1213.
- [11] Rao G A, Mahuliker S P. Effect of atmospheric transmission and radiation on aircraft infrared signatures [J]. *Journal of Aircraft*, 2005, 42(5): 1046-1054.

## 下期预览

# 基于 FPGA 和 DSP 技术的自适应光学系统在线 大气湍流参数测量平台

母 杰<sup>1,2,3</sup>, 郑文佳<sup>1,2</sup>, 李 梅<sup>1,2</sup>, 饶长辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学研究室, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院自适应光学  
重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了实现大气湍流参数的实时估计, 提出并设计了一种基于 FPGA 和 DSP 技术的自适应光学系统在线大气参数测量平台。该测量平台采用 FPGA 作为前端处理器, 在自适应光学系统闭环工作时, 利用多通道并行技术和流水线技术从闭环数据高速复原开环泽尼克系数, 采用 DSP 作为后端处理器, 根据复原的开环泽尼克系数, 利用其编程灵活的特点实现大气相干长度  $r_0$ 、外尺度  $L_0$ 、风速  $v$  和相干时间  $t_0$  的复杂统计运算。最后将该测量平台应用在 127 单元的自适应光学系统上, 以实际天文恒星为观测目标, 进行了大气湍流参数的测量。