

〈 制导与对抗 〉

基于长波红外的高空飞机蒙皮辐射测量方法研究

马 骏^{1,2}, 温茂星¹, 周 峰³

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国人民解放军 95899 部队, 北京 100096)

摘要: 本文提出一种对飞行中的飞机蒙皮进行辐射测量和温度反演的的方法。首先建立蒙皮辐射模型、大气传输模型和绝对辐射校正模型, 然后推导出温度反演的公式, 使用逐次逼近法计算蒙皮温度。在理论分析的基础上, 使用 8~12 μm 的宽波段长波红外相机进行试验验证和温度反演, 对反演温度的不确定度计算并进行修约, 得到 5 km 飞行高度的民航飞机蒙皮温度的修约结果为 268 K, 修约不确定度为 4 K, 修约相对不确定度为 1.49%。论文研究工作对获取飞机目标红外辐射特性有重要参考价值。

关键词: 长波红外; 温度测量; 蒙皮; 大气衰减; 逐次逼近; 不确定度分析

中图分类号: TP722.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)03-0284-08

Skin Radiation Measurement Method of High Altitude Aircraft Based on Long Wave Infrared Light

MA Jun^{1,2}, WEN Maoxing¹, ZHOU Feng³

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology,

Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. 95899 Unit, The Chinese People's Liberation Army, Beijing 100096, China)

Abstract: This paper presents a method for radiation measurement and temperature inversion of aircraft skin in flight. Firstly, the skin radiation, atmospheric transport, and absolute radiation correction models are established. Then, the formula of temperature inversion is deduced, and the skin temperature is calculated by successive approximation. Based on theoretical analysis, a wideband long wave (infrared) camera that can image light of wavelength 8-12 μm is used for experimental verification and temperature inversion. By calculating and modifying the uncertainty of inverted temperature, the result of modifying the skin temperature of civil aircraft at 5 km flight height is 268 K; the uncertainty of modifying is 4 K, and the relative uncertainty of modifying is 1.49%. The research work of this paper would be useful for acquiring infrared radiation characteristics of aircraft targets.

Key words: long wave infrared, temperature measurement, skin, atmospheric attenuation, successive approximation, uncertainty analysis

0 引言

随着红外探测和跟踪技术的发展, 对飞机红外辐射特性的研究得到更多的重视。蒙皮是飞机的主要辐

射源之一, 目前对蒙皮辐射的研究也非常活跃。张海兴等对飞机红外特性进行了建模与计算^[1-2], 吕建伟等人采用有限体积法求解飞机蒙皮温度分布, 并综合分析了飞机蒙皮表面长波段的红外辐射特性^[3-4], 夏

收稿日期: 2020-03-14; 修订日期: 2020-06-05.

作者简介: 马骏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电信息获取技术方面的研究。E-mail: majunball@163.com.

基金项目: 高分专项民用航空项目(30H33D01900613/15)。

新林对飞机蒙皮红外辐射进行了瞬态温度场分析^[5]。但当前对飞机红外辐射特性的研究大部分为理论建模和数据仿真,或者地面测试状态下对飞机蒙皮或尾焰进行辐射测量,极少有对飞行状态的飞机进行辐射特性测量的研究。而针对飞行状态飞机蒙皮温度等辐射特性进行测量的方法主要有贴热电偶测量和飞机伴飞测量,在针对敌机等目标时通用性受到限制。因此本文提出了一种在地面采用长波红外成像仪跟踪测量飞行中飞机蒙皮温度的方法。

本文针对飞行高度5 km的民航飞机,使用8~12 μm的宽波段长波相机进行观测。首先理论分析民航飞机的测温方法,包括建立蒙皮辐射模型、大气传输模型、绝对辐射定标模型和温度反演的公式与方法,然后提出引起误差的因素;在此基础上进行辐射测量实验,通过实验获取飞机蒙皮辐射数据,根据理论测量方法反演计算蒙皮温度,并进行误差分析得到温度测量的不确定度。

1 蒙皮测温理论模型和反演方法

1.1 蒙皮辐射模型

飞机蒙皮的辐射主要分为自身热辐射和对环境辐射的反射,对环境辐射的反射主要包括:对太阳辐射的反射、对大气背景辐射的反射和对地物辐射的反射^[6]。

本文主要针对飞机蒙皮长波段内的辐射,太阳辐射主要集中在可见、近红外和短波红外波段,因此太阳辐射的反射可以忽略。对于高空飞机目标,飞机蒙皮接收地物辐射的立体角很小,因此飞机蒙皮反射的地物辐射远小于蒙皮自身辐射^[7]。而大气辐射本身发射率低,辐射量小,因此飞机蒙皮反射的大气辐射也远小于蒙皮自身辐射^[8]。因此可将蒙皮辐射近似为蒙皮自身热辐射。将飞机蒙皮看作面源的朗伯灰体,根据朗伯辐射关系,可得其辐亮度为:

$$L_T(\lambda) = \varepsilon M_{\lambda} / \pi = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中: $L_T(\lambda)$ 为飞机蒙皮辐亮度; ε 为飞机蒙皮的发射率; M_{λ} 为黑体辐射出射度; λ_1 和 λ_2 为宽波段相机的起始波长与终止波长; λ 为波长; T 为飞机蒙皮的温度; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; c 为光速。

1.2 大气传输模型

蒙皮辐射的大气传输模型包括2个方面:一是大气背景辐射,二是大气衰减。

飞机蒙皮的红外辐射传输过程如图1所示。可将长波红外成像仪接收到的辐射源分为远端大气、飞机

蒙皮和近端大气3部分。其中飞机上方天空的大气叫做远端大气,飞机与地面之间的大气叫做近端大气。

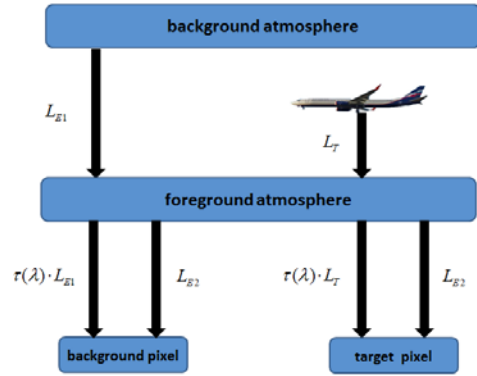


图1 蒙皮辐射传输过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of skin radiation transmission process

如图1所示,背景像元接收到的入瞳辐亮度分为两部分:一部分为远端大气透过近端大气的辐射,一部分为近端大气的辐射。则背景像元接收到的入瞳辐亮度 L_{BP} 可表示为:

$$L_{BP} = \tau(\lambda) \cdot L_{E1} + L_{E2} \quad (2)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为近端大气透过率; L_{E1} 为远端大气辐射; L_{E2} 为近端大气辐射。

目标像元接收到的入瞳辐亮度也分为两部分:一部分为飞机蒙皮透过近端大气的辐射,一部分为近端大气的辐射。则目标像元接收到的入瞳辐亮度 L_{TP} 可表示为:

$$L_{TP} = \tau(\lambda) \cdot L_T + L_{E2} \quad (3)$$

式中: L_T 为蒙皮自身辐射。

而对于长距离上的低空大气,通常可认为是光学厚^[9],远端大气产生的辐亮度可以忽略不计,即满足:

$$L_{E2} \approx \tau(\lambda) \cdot L_{E1} + L_{E2} \quad (4)$$

因此满足:

$$L_{BP} \approx L_{E2} \quad (5)$$

长波成像仪接收到的目标信号入瞳辐亮度其实就是蒙皮辐射经过大气衰减后的蒙皮辐亮度,整合上述式子,可计算入瞳处接收到的目标信号辐亮度:

$$L_{E2}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot L_T = L_{TP} - L_{BP} \quad (6)$$

即入瞳处接收到的飞机蒙皮(目标信号)的辐亮度等于目标像元的入瞳辐亮度减去背景像元的入瞳辐亮度。

将式(1)带入式(6),整理得目标信号的入瞳辐亮度为:

$$L_{DT}(\lambda) = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (7)$$

大气透过率 $\tau(\lambda)$ 是随 λ 呈不规则变换的因式,无法

对其直接求积分。相比起使用平均大气透过率进行积分计算，将 8~12 μm 分成多个小段进行大气透过率曲线拟合，分别求积分进行累加得到的结果更加精确。即将宽波段 λ₁~λ₂ 分为 I 个小波段，在第 i 小波段内视大气透过率 τ_i(λ) 为常数，对每个小波段内的辐亮度单独进行积分计算，最后对 I 段辐亮度累加得到目标信号入瞳辐亮度 L_{DT}(λ)，表达式如式(8)所示。分段大气透过率如表 1 所示。

$$L_{DT}(\lambda) = \sum_{i=1}^I \frac{\varepsilon}{\pi} \cdot \tau_i(\lambda) \cdot \int_{\lambda_{a_i}}^{\lambda_{b_i}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (8)$$

表 1 分段大气透过率

Table 1 Atmospheric transmittance of different waveband

Waveband number (i)	Starting wavelength (λ _a)	Termination wavelength (λ _b)	Atmospheric transmittance (τ)
1	λ _{a1}	λ _{b1}	τ ₁
2	λ _{a2}	λ _{b2}	τ ₂
...
I-1	λ _{aI-1}	λ _{bI-1}	τ _{I-1}
I	λ _{aI}	λ _{bI}	τ _I

1.3 辐射校正模型

绝对辐射定标是为了得到获取的辐射响应 DN (Digital Number) 值与入瞳辐亮度的对应关系，对目标红外辐射具有极其重要的意义。

辐射源强度和探测器测得的辐射响应之间存在一定的线性关系^[10]。这种关系可以表达为：

$$N = k \cdot L_D(\lambda) + b \quad (9)$$

式中：N 为长波相机测得的辐射响应 DN 值；b 为暗电平下红外成像仪的偏移 DN 值；k 为探测器响应度；L_D(λ) 为入瞳辐亮度。

在标定过程中，镜头与黑体距离很近，可忽略掉衰减，即认为 L_D(λ) = L_B(λ)，L_B(λ) 为黑体辐亮度，可由黑体温度和黑体发射率根据式(1)计算得到。

通过两组(N, L_D(λ))，求出对应系数(k, b)，即可求得辐射响应 DN 值与入瞳辐亮度，完成绝对辐射定标。

1.4 蒙皮温度反演模型

式(8)为目标入瞳辐亮度计算公式，在系统参数和大气衰减模型参数均确定的情况下，表明目标入瞳辐亮度 L_{DT}(λ) 仅与飞机蒙皮温度 T 有关。

$$L_{DT}(\lambda) = f(T) \quad (10)$$

同理也可写作：

$$T = g(L_{DT}(\lambda)) \quad (11)$$

式(6)表明了入瞳处接收到的飞机蒙皮（目标信

号）的辐亮度等于目标像元的入瞳辐亮度减去背景像元的入瞳辐亮度。相应的，目标信号对应的 DN 值 N_T 应该等于目标像元的 DN 值 N_{TP} 减去背景像元的 DN 值 N_{BP}，即：

$$N_T = N_{TP} - N_{BP} \quad (12)$$

结合式(9)(12)，可得：

$$N_T = (k \cdot L_{TP}(\lambda) + b) - (k \cdot L_{BP}(\lambda) + b) = k \cdot L_{DT}(\lambda) \quad (13)$$

整理式(11)(12)(13)，可得：

$$T = g\left(\frac{N_{TP} - N_{BP}}{k}\right) \quad (14)$$

由此便获得了蒙皮温度 T 与所测得的目标像元 DN 值和背景像元 DN 值的函数关系。

但是由式(8)可知，入瞳辐亮度 L_{DT}(λ) 与温度 T 函数关系为积分累加，相当复杂，因此很难反向推导温度 T 关于入瞳辐亮度 L_{DT}(λ) 的函数 g(x)，推导式(14)进行温度计算难以实现。因此本文采用了逐次逼近法进行求解，原理和步骤如下。

将式(8)中通过蒙皮温度和大气传输模型计算得到的 L_{DT}(λ) 用 L_{DT_T}(λ, T) 表示，即 L_{DT_T}(λ, T) = f(T)，L_{DT_T}(λ, T) 为单调增函数。将式(13)用绝对辐射定标的 DN 值计算得到的入瞳辐亮度 L_{DT}(λ) 用 L_{DT_N}(λ, N) 表示，即 L_{DT_N}(λ) = $\frac{N_{TP} - N_{BP}}{k}$ 。两者相互独立计算。

将式(13)计算得到的 L_{DT_N}(λ, N) 作为目标信号的实际入瞳辐亮度（计算基准），记作 L。然后选定一个蒙皮温度的初值 T_r，计算 f(T_r) 并与 L 进行比较。由于 f(T) 为单调增函数，因此可以通过对 T 越来越高精度的修正，使得 f(T) 和 L 逐次逼近直至趋于相等，此时的修正温度即为计算得到的蒙皮温度。

逐次逼近法流程如图 2 所示，得到 T₃ 即为修正精度 0.01K 的蒙皮温度。此流程框图假设了 f(T_r) < L，若 f(T_r) > L 亦同理。

本文选取飞机蒙皮恢复温度作为蒙皮温度的初值 T_r^[11]，其计算公式如下：

$$T_r = T_0 \left(1 + \sqrt{r} \cdot \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M^2\right) \quad (15)$$

式中：T₀ 为蒙皮周围大气温度；r 为普朗特数，对于空气 r ≈ 0.72；γ 为空气的定压热容量和定容热容量之比，通常取 γ = 1.3；M 为飞行器飞行马赫数。

$$T_0 = T_L - \eta H \quad (16)$$

式中：T_L 为地面气温；H 为飞机高度；η 为温度随高度变化系数，一般按照 0.006 计算。

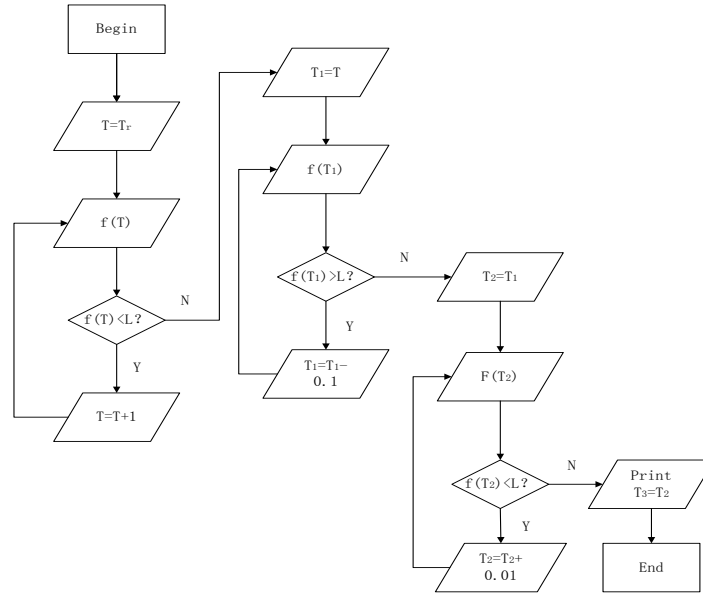


图2 逐次逼近法流程

Fig.2 Flow chart of the successive approximation

2 测量试验与结果计算

2.1 实验条件与试验参数

本次观测实验目的为使用 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的宽波段长波相机在地面对飞行中飞机进行捕获与追踪观测,以获取飞机蒙皮辐射数据并进行温度反演。外场实验观测地点为上海市虹口区中科院上海技术物理研究所22号楼九楼天台,观测时间为2018年10月18日晚18:30分,天气晴,气温为 17°C ,即 $290\ \text{K}$,观测目标为上海浦东飞往泰国普吉的吉祥航空HO1311民航飞机。根据航旅纵横app航班实时轨迹,飞机飞行高度约 $5\ \text{km}$,观测仰角为 50° 。飞行速度约 $600\ \text{km/h}$,即 $0.49\ \text{Ma}$ 。

2.2 数据处理与温度反演

根据第1章的理论分析,数据处理与反演主要包括3个部分:①根据蒙皮辐射和大气传输模型计算得到的目标信号入瞳辐亮度 $L_{\text{DT}_T}(\lambda, T)$;②根据绝对辐

射定标DN值计算得到的目标信号入瞳辐亮度 $L_{\text{DT}_N}(\lambda, N)$ 。③对 $L_{\text{DT}_T}(\lambda, T)$ 和 $L_{\text{DT}_N}(\lambda, N)$ 进行逐次逼近进行温度反演。

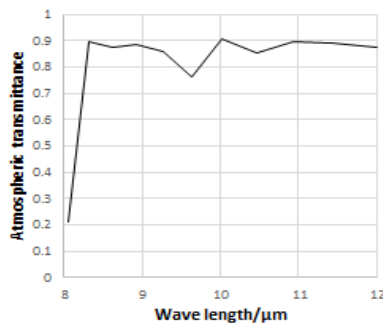
1) 蒙皮辐射和大气传输模型部分

根据调研,民航飞机蒙皮使用铝粉和酚醛树脂混合涂层,其发射率约为 0.9 ^[12-13],而一些的调研中,飞机蒙皮在 $10\ \mu\text{m}$ 处的平均发射率为 0.85 左右^[14],本文按照 0.9 进行计算。

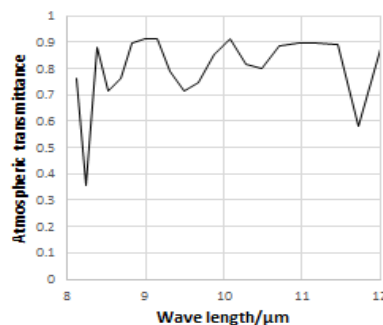
本实验使用 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的宽波段长波相机,起始终止波长分别为 $\lambda_1=8\ \mu\text{m}$, $\lambda_2=12\ \mu\text{m}$ 。

蒙皮的温度初值与地面气温、飞机飞行高度和飞机飞行速度有关,将参数带入式(15)(16),估算得飞机蒙皮温度初值 $T_r=267.95\ \text{K}$ 。

根据高度 $5\ \text{km}$,仰角 50° 设置大气透过率参数;根据不同的波长分段数,得到不同精度下的大气透过率折线图如图3所示。

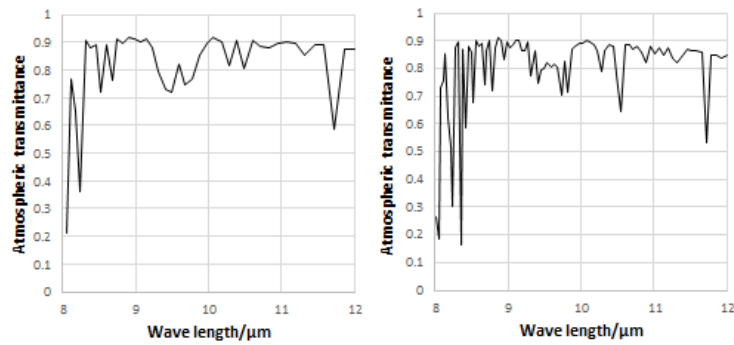


(a) 10段,平均精度 400nm



(b) 20段,平均精度 200nm

(a) 10-segments, average accuracy 400 nm (b) 20-segments, average accuracy 200 nm



(c) 40 段, 平均精度 100 nm (d) 80 段, 平均精度 50 nm

(c) 40-segments, average accuracy 100 nm (d) 80-segments, average accuracy 50 nm

图 3 不同精度下的大气透过率折线图

Fig.3 Polygonal chart of atmospheric transmittance with different accuracy

由图可见精度越高分段越多, 计算结果更加精确, 误差更小。因此数据计算采用分段 80 段, 平均精度 50 nm 的大气透过率, 具体见表 2。

表 2 8~12 μm 平均精度 50 nm 的大气透过率

Table 2 Atmospheric transmittance with average accuracy of 50 nm in 8-12 μm

Waveband number (i)	Starting wavelength (λ _a)	Termination wavelength (λ _b)	Atmospheric transmittance (τ)
1	8.01282	8.04505	0.2667
2	8.04505	8.07754	0.1837
...
79	11.8624	11.93317	0.9392
80	11.93317	12.00480	0.8473

将上述参数带入式(8), 即可计算目标信号入瞳辐亮度 $L_{DT-T}(\lambda, T)$ 。

2) 绝对辐射校正部分

本次绝对辐射标定实验在观测实验前 15 min 进行, 保证与观测实验环境尽可能相同, 可以减小误差。本次标定实验选用 SR880R-7D-HU 面源黑体作为校准源, 实验所用黑体的发射率为 0.99, 温度范围为 5~95 °C (278~368 K)。标定时将实验所用黑体充满视场、近距离放置在长波红外成像仪的正前方。

辐射定标实验中, 黑体温度起始为 278 K, 终止为 291 K, 1 K 为步长, 共 14 个测温点, 重复 3 次实验, 测得各测温点辐射 DN 值并求均值 N_{signal} ; 然后由式(1)计算 278~291 K 共计 14 个测温点的黑体辐亮度 $L_D(\lambda)$; 两者对应关系如图 4 所示, 可见线性度良好, 可以使用线性定标。

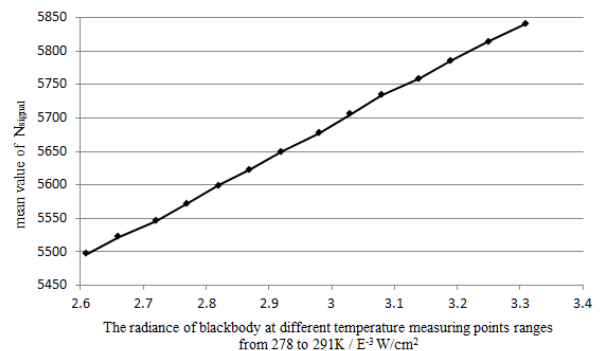


图 4 DN 值与黑体辐亮度对应关系

Fig.4 Corresponding relation between DN values and blackbody radiance

在 8~12 μm 波段内, 278 K 和 291 K 黑体辐亮度分别为 $2.61 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 和 $3.31 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$, 对应 DN 值 N_{signal} 为 5497 和 5841。带入式(9)可求得 $k=491.43$, $b=4214$ 。即得到长波红外成像仪响应 N 与入瞳辐亮度关系为:

$$N = 491.43L(\lambda)_D + 4214 \quad (17)$$

由于高空飞机蒙皮温度较低, 加上大气衰减的影响, 实际入瞳处的辐亮度略小于辐射源最低温度 278K 黑体的辐亮度。因此需要验证线性标定的延伸是否线性度良好。

计算得 298 K 黑体辐亮度为 $3.72 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$, 代入式(17)得:

$$N_{\text{signal}_{298\text{K}}} = 491.43 \times 3.72 + 4214 \approx 6042 \quad (18)$$

而使用标准辐射源测得 298 K 黑体辐射 DN 值为 6040, 差值在噪声范围内。因此定标数据外的延伸温度点线性度依然良好, 因此蒙皮的辐亮度和温度同样可认为符合式(17)线性。

3) 反演入瞳辐亮度

观测得到的民航飞机图像如图5所示,民航飞机轮廓明显。选择图像中靠近机翼与尾部的像素点作为典型信号像元。信号像元DN值 $N_{TP}=5063$, 天空背景DN值 $N_{BP}=4281$, 根据式(17), 计算可得 $L_{DN,N}(\lambda, N)=1.591 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 。

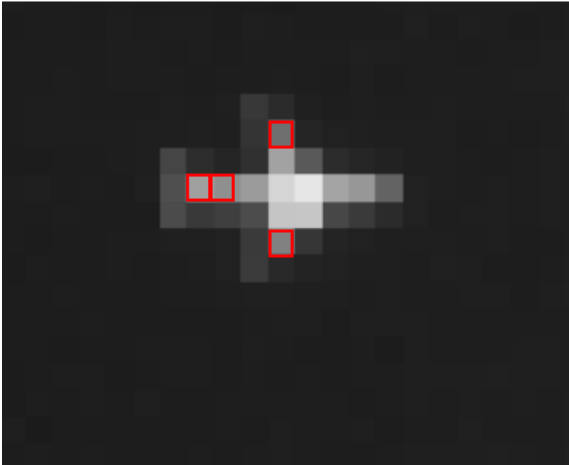


图5 民航飞机红外图像

Fig.5 Infrared image of a civil aviation aircraft

然后对 $L_{DT,T}(\lambda, T)$ 和 $L_{DT,N}(\lambda, N)$ 使用 1.3 节所述的逐次逼近法, 计算得蒙皮温度为 $T=268.42 \text{ K}$ 。

2.3 不确定度分析计算

根据不同原因引起的不确定度, 有不确定度 A 类评定和不确定度 B 类评定两类评定方法^[15]。

不确定度 A 类评定是用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度^[16], 其表达式为:

$$\sigma_A(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n}} \quad (19)$$

式中: n 为统计次数; \bar{x}_i 为观测结果 x_i 的平均数。

不确定度 B 类评定是用实验或其他信息来估计不确定度^[15], 含有主观鉴别的成分。其表达式为:

$$\sigma_B(x) = \frac{a}{k_p} \quad (20)$$

式中: a 为鉴别的不确定度的半宽; k_p 为包含因子。一般采取置信概率 95%, 包含因子为 1.96 进行计算。

温度反演的不确定度主要与以下几个量相关:

1) 蒙皮发射率的不确定度。不同飞机蒙皮材料及其氧化程度不同, 其发射率也有所差异, 本文只能通过资料查询估算蒙皮发射率, 与实际观测飞机蒙皮存在估算误差。蒙皮发射率的不确定度属于不确定度 B 类评定。

根据 2.2 节的蒙皮发射率的调研, 蒙皮发射率不

确定度半宽为 0.05。根据式(20)得 $\sigma_\varepsilon=0.255$, 则相对不确定度 $\sigma_\varepsilon/\varepsilon=3\%$, 综合引入 3% 蒙皮发射率的相对不确定度。

2) 大气透过率的不确定度。MODTRAN 软件计算的是不同窄波段上的离散的大气透过率值, 与实际的大气传输曲线有差别; 同时 MODTRAN 软件中大气环境与实验环境下的大气环境也有差异。大气透过率的不确定度属于不确定度 B 类评定。

根据国内大气透过率建模计算的文献调研^[17-19], 真实大气透过率与 MODTRAN 计算结果相对误差不足 5%, 加上线性拟合产生的误差, 综合引入 5% 大气透过率的相对不确定度, 表达式为 $\sigma_\tau/\tau=5\%$ 。

3) 辐射传输模型计算入瞳辐亮度的不确定度。在 2.1 中简化了辐射模型和传输模型, 在长波红外波段忽略掉太阳辐射、大气辐射和地物辐射在蒙皮上的反射, 会产生入瞳辐亮度的误差。辐射传输模型计算入瞳辐亮度的不确定度属于不确定度 B 类评定。

根据环境辐射对飞机红外辐射影响文献调研^[7], 综合引入 3% 辐射模型计算得到的入瞳辐亮度的相对

不确定度, 表达式为: $\frac{\sigma_{L_{DT,T}}}{L_{DT,T}} = 3\%$ 。

4) 辐射定标计算入瞳辐亮度的不确定度。由两部分组成: 一部分是实验室黑体温度和发射率误差引起的辐射定标不确定度, 属于不确定度 B 类评定; 另一部分是镜头等自身光机结构在不同的温度湿度环境下, 自身辐射会产生变化, 会引起探测器暗电平 DN 值变化, 从而引起辐射定标不确定度, 属于不确定度 A 类评定。

根据定标黑体的文献调研^[20], 黑体辐射的相对不确定度约为 0.9%。经过多次辐射定标测量实验并求标准差可得, 光机结构背景辐射的相对不确定度为 1.18%。对两者进行不确定度合成^[15], 可得辐射定标

结果的不确定度为 $\frac{\sigma_{L_{DT,N}}}{L_{DT,N}} = 1.55\%$ 。

根据合成不确定度公式^[15], 温度 T 的不确定度可表示为:

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{dT}{d\varepsilon}\right)^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \left(\frac{dT}{d\tau}\right)^2 \cdot \sigma_\tau^2 + \left(\frac{dT}{dL_{DT,T}}\right)^2 \cdot \sigma_{L_{DT,T}}^2 + \left(\frac{dT}{dL_{DT,N}}\right)^2 \cdot \sigma_{L_{DT,N}}^2} \quad (21)$$

式中: σ_T 为温度的不确定度; σ_ε 为蒙皮发射率不确定度; σ_τ 为大气透过率不确定度。 $\sigma_{L_{DT,T}}$ 为蒙皮辐射传

输模型计算的入瞳辐亮度不确定度； $\sigma_{L_{DT_N}}$ 为绝对辐射定标计算的入瞳辐亮度不确定度。

根据式(1)可推导得：

$$\frac{dT}{d\varepsilon} \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (22)$$

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (23)$$

$$\frac{dT}{dL_{DT}} = \frac{dT}{dL_{DT_T}} = \frac{dT}{dL_{DT_N}} \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \frac{1}{L_{DT}} \quad (24)$$

将式(22)(23)(24)代入式(21)并化简，得：

$$\sigma_T = \frac{\lambda k T^2}{hc} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau(\lambda)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L_{DT_T}}}{L_{DT_T}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L_{DT_N}}}{L_{DT_N}}\right)^2} \quad (25)$$

将各分量不确定度和反演温度带入式(25)，计算可得蒙皮温度不确定度 $\sigma_T = 3.37\text{K}$ 。

蒙皮温度 268.42 K 和蒙皮温度不确定度 3.37 K 均为计算结果，实际测量精度并无法达到 0.01 K，而应以不确定度为准。对不确定度和蒙皮温度进行修约，得到蒙皮温度 $T = 268\text{K}$ ，不确定度 $\sigma_T = 4\text{K}$ ，则修约后的相对不确定度为 $\frac{\sigma_T}{T} = \frac{4}{268} \times 100\% = 1.49\%$ 。

3 结论

本文提出了一种长波探测器测量飞机蒙皮温度的方法。首先提出理论计算方法：建立蒙皮辐射的大气衰减模型和绝对辐射校正模型，推导反演公式，使用逐次逼近法计算飞机蒙皮温度。在理论基础上进行外场观测实验，得到图像与辐射数据，进行数据处理反演计算得到飞机蒙皮温度，证明建立大气衰减和绝对辐射校正两个模型并使用逐次逼近法，可以测量高空飞机蒙皮的温度。最后对不确定度进行了分析计算，修约后得到所测 5 km 飞行高度的飞机蒙皮温度为 268 K，相对不确定度为 1.49%。证明本文提出的研究方法，可以对飞行中的飞机蒙皮进行较高精度的辐射测量和温度反演，研究工作对获取飞机目标红外辐射特性有重要参考价值。

参考文献：

[1] 张海兴, 张建奇, 杨威, 等. 飞机红外辐射的理论计算[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(1): 78-81.
ZHANG H X, ZHANG J Q, YANG W, et al. Theoretical calculation of

the IR radiation of an aeroplane[J]. *Journal of Xidian University*, 1997, 24(1): 78-81.

[2] 翟泉慧, 王强, 额日其太. 高速飞机红外成像特性数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 146-148.
ZHAI Q H, WANG Q, Eriqitai. Numerical simulation of IR image of high-speed aircraft[J]. *Journal of Laser and Infrared*, 2002, 32(3): 146-148.

[3] LU JW. Effect of temperature and emissivity of aircraft skin on infrared radiation characteristics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(2): 50-54.

[4] LU J W, WANG Q. Aircraft-skin infrared radiation characteristics modeling and analysis[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(5): 493-497.

[5] 夏新林, 艾青, 任德鹏. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 174-177.
XIA X L, AI Q, REN D P. Analysis on the Transient Temperature Fields for Infrared Radiation of Aircraft Skin [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(3): 174-177.

[6] 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.
HUANG W, JI H H. 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.

[7] 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(二): 应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2039-2043.
HUANG W, JI H H. Effect of reflected background radiation by skin on infrared signature of subsonic aircraft (II): application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2039-2043.

[8] 康丽珠, 赵劲松, 李振华, 等. 飞机目标红外辐射特性研究现状概述[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 105-115.
KANG L Zh, ZHAO J S, LI Zh H, et al. The Overview of the Research Work Developments on Infrared Signature of Aircrafts[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(2): 105-115.

[9] 肖喜中, 王跃明, 马骏, 等. 飞机红外光谱辐射特性的多光谱测量[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 300-305.
XIAO X Zh, WANG Y M, MA J, et al. Multispectral measurement of infrared radiation characteristics of an aircraft[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 300-305.

[10] 曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3~5μm 红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 858-864.
CAO L H, LI N, YANG C Y, et al. Radiation calibration for 3-5μm infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864.

- [11] 王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(9): 996-1001.
WANG C Zh, TONGZh X, LU Y L, et al. Study on airplane's infrared radiation characteristics[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(9): 996-1001.
- [12] 刘波, 郑伟, 李海洋. 材料表面发射率测量技术研究进展[J]. *红外技术*, 2018, **40**(8): 725-732.
LIU B, ZHENG W, LI H Y. Research progress in measurement technology of material surface emissivity[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(8): 725-732.
- [13] 冯云松, 路远, 凌永顺, 等. 发射率对飞机蒙皮温度及红外辐射特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(2): 294-299.
FENG Y S, LU Y, LING Y S. Influence of surface emissivity on temperature and infrared radiation characteristics of aircraft skin Infrared and Laser Engineering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2) 294-299.
- [14] 胡壮丽. 钢和铝合金表面发射率特征的实验研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2010.
HU Zhuangli. Research on Emissivity Characteristics of Steel And Aluminum Alloy[D]. Xingxiang: Henan Normal University, 2010.
- [15] 王中宇, 刘智敏, 夏新涛. 测量误差与不确定度评定[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WANG Zh Y, LIU Zh M, XIA X T. *Measurement Error and Uncertainty evaluation*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [16] 孙娟, 刘莹娟, 夏丽昆, 等. 热释电探测器 NEP 参数测量不确定度分析与计算[J]. *红外技术*, 2008, **30**(4): 192-195.
SUN J, LIU Y J, XIA L K, et al. Analysis and calculation of uncertainty in measurement of NEP parameters of pyro-electric detector[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(4): 192-195.
- [17] 杨建清, 罗积军, 徐军, 等. 基于 CART 的红外辐射大气透过率的计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, **55**(3): 030101.
YANG J Q, LUO J J, XU J, et al. Calculation of Infrared Radiation Atmospheric Transmittance Based on CART [J]. *Laser & Optoelectronics*, 2018, **55**(3): 030101.
- [18] 陈秀红, 魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外透过率变化特性[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(11): 1090-1093.
CHEN X H, WEI H L. Variation of infrared atmospheric transmittance based on atmospheric model in typical regions of China[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(11): 1090-1093.
- [19] 赵志军, 许方宇, 魏超群, 等. 红外整层大气透过率测量方法研究[J]. *红外技术*, 2018, **40**(7): 718-722.
ZHAO Zh J, XU F Y, WEI Ch Q, et al. Study on Measurement Method for Total Infrared Atmospheric Transmittance[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(7): 718-722.
- [20] 原遵东. 黑体辐射源发射率对辐射测温准确度的影响及修正方法[J]. *计量学报*, 2007, **28**(3A): 19-22.
YUAN Z D. The effect and correction of blackbody radiation emissivity on the accuracy for radiation thermometry[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3A): 19-22.