

基于红外热成像的热流分布测量技术

毛羽丰¹, 李运泽¹, 王 晶², 姜利祥², 魏传峰³

- (1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083;
2. 北京卫星环境工程研究所可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094;
3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 针对各种复杂、极端热环境下的表面热流密度测量难题, 提出了一种基于红外热成像技术的表面热流密度分布测量方法。热流测量借助贴敷在被测物体表面的特制信标, 从红外热图中计算获得各项测量参数。其结合了接触式测量与非接触式测量的优点, 区别于传统单点测量可以一次性完成二维覆盖测量, 保证测量精度的同时适用于更广泛的工程环境, 具有很大的工程及生产实践意义。研究中先后从系统构建、原理分析及数值仿真的角度入手, 得到测量的理论误差小于 2%, 证明了基于红外热图技术的热流密度分布测量方法的可行性与正确性。

关键词: 热流测量; 红外热成像; 虚拟样机; 仿真

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0804001

Heat-flux measurement technology based on infrared thermography

Mao Yufeng¹, Li Yunze¹, Wang Jing², Jiang Lixiang², Wei Chuanfeng³

- (1. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;
2. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Focusing on the problem of heat-flux measuring in complex and extreme circumstances, a new measuring method based on infrared thermography was proposed. Be superior to traditional radiation heat flow meter which can only measure heat flow at one point, the thermal distribution and heat flow distribution could be gotten easily and accurately in one time with help of a made-to-measure beacon, combined the advantages of contact and non-contact measurement. This study was divided by three parts, theoretical analysis, system construction and numerical simulation. Less than 2% theoretical error was obtained which verifies the accuracy and feasibility of heat-flux measurement technology based on infrared thermography.

Key words: heat flow measurement; infrared thermography; virtual model; simulation

收稿日期: 2015-12-06; 修订日期: 2016-01-09

基金项目: 北京卫星环境工程研究所可靠性与环境工程技术重点实验室开放基金(524716)

作者简介: 毛羽丰(1990-), 男, 博士生, 主要从事于航天器热控制、人机环境方面的研究。Email: maoyf@buaa.edu.cn

导师简介(通讯作者): 李运泽(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事飞行器热控制与热管理技术方面的研究。Email: buaalyz@163.com

0 引言

在高超声速飞行器的研制中,作为一项直接影响材料及结构设计的重要设计参数,飞行器表面气动热流通常可以达到 700 W/cm^2 (驻点位置 $1\ 900\text{ W/cm}^2$),温度在 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。在 NASA 的极高声速飞行器气动边界层实验(HyBoLT)中,Scott A. Berry 等人利用红外热成像技术观察飞行器表面的温度分布及边界层转捩状态^[1-2],利用红外热成像技术的测温能力对气动加热表面的温度分布进行了研究。国内的张海林等人利用热成像研究了高超声速飞行器气动热的辐射特性,探究飞行器不同方向上不同波段的红外辐射强度^[3]。

红外热成像技术已较为成熟,非接触及二维分布式测量的特点优于传统接触式单点测量,被广泛应用于各种工程实践的测温领域^[4]。在非接触热流测量领域,传统的辐射式热流计仅能测得辐射热流,在一些复杂、极端热环境的工况中会产生较大的误差^[5]。笔者未查到任何利用红外技术测量表面热流密度的文献及相关报道。

因此文中提出了一种基于红外热图技术的新型热流测量方式,旨在能够准确、方便地对物体表面热流密度进行分布式测量。首先详细介绍了红外置标热流测量系统模型及算法设计;然后利用仿真计算得到了测量系统的理论误差,测量结果误差小于 2% ,证明了测量方法的可行性与准确性;最后通过对仿真误差的分析总结出研究结论。

1 红外置标热流测量系统设计

红外置标热流测量装置由三部分构成,分别是热流测量信标、红外图像采集及红外图像处理模块,如图 1 所示。三个部分协同工作,可以完成被测物体表面温度场及热流场的实时输出。

特制的热流测量信标被设计为一个圆形薄片,厚度在 2 mm 以内,面积在 $2\sim 4\text{ cm}^2$ 之间,信标包含四种材料制成的四个标志区,每个标志区的辐射率等热物理特征被精心设计,分别适应高温及低温工况的测量。查阅工程辐射率表及相关文献资料,选择表 1 所示的材料作为信标标志区材料。

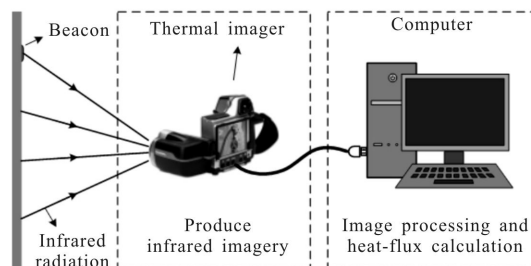


图 1 红外置标热流测量系统设计

Fig.1 Equipment design of heat flow measurement

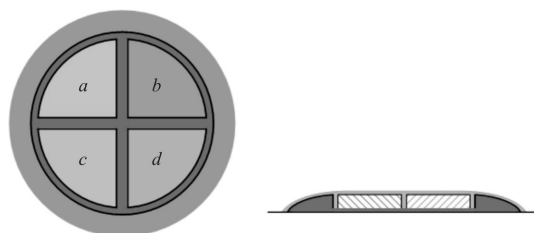


图 2 热流测量信标的形态设计

Fig.2 Structural design of the beacon for heat-flux measurement

表 1 信标材料选择

Tab.1 Material selection of beacon

Area	Material	Radiancy	Temperature/ $^\circ\text{C}$
a	Polished titanium	0.15-0.20	100-500
b	Oxidation of steel	0.78-0.82	125-525
c	Polished steel	0.14-0.30	400-1200
d	Nichrome	0.71-0.79	500-1300

红外图像采集利用红外热像仪完成;红外图像处理包括图像处理算法及热流测量算法两部分。图像处理算法将辐射信息数据从红外图像中提取出来,而热流测量算法负责处理这些数据,解算出被测物体表面的温度场和热流场。

2 红外置标热流测量的原理

2.1 红外热像仪测温原理

红外热像仪探测器阵列接收到红外辐射会根据辐照强度转换为相应的电压信号,将电压信号转为数字信号记录打包就可以得到红外照片。

红外热像仪接收到的红外辐射通常为被测物体、环境以及热像仪自身辐射共同作用下的红外辐射。用刻度函数 $T_R(T_r)$ 来表征其大小^[6]:

$$T_R(T_r) = CT_r^n \quad (1)$$

式中: C 与 n 为常数,其数值由热像仪结构决定; T_r 为

表观温度,表示等效辐射黑体的温度。

根据已知的刻度函数就可以求得 T_r 。根据辐射率 ε 可求出物体的实际温度:

$$T = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_r^n - (1-\varepsilon)T_u^n] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中: ε 为物体的辐射率; T_u 为环境温度。

2.2 红外图像处理

在对红外图像进行处理之前,首先需要清楚红外图像的特点^[7]:(1) 没有标准的图像格式,常见有 bmp、jpeg、gif 等;(2) 结构简单,大小固定;(3) 为灰度图或索引图格式,不含颜色信息;(4) 包含了测温参数、测温模式、测温时间等相关信息。

这里以典型的红外热像仪为例,红外图像分辨率为 256×256 ,以 Unit 8 位数据存储。参考参考文献[8]完成图像处理算法设计,如图 3 所示。

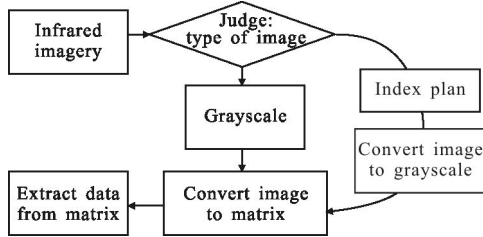


图 3 红外图像处理流程

Fig.3 Flow chart of infrared imagery processing

2.3 红外置标热流测量算法

热流测量信标经过提前标定,标志区辐射率 ε_a , ε_b , ε_c , ε_d , 面积热阻 r_x 已知;与被测物体处在同样的热环境中;环境温度 T_u ;对流传热系数 h 。

如图 4 所示,信标标志区 a 、 b 在外热流 $Q(i, j)$ 的作用下,接收到同样的热流密度 q 。并会以三种基本传热方式将热流散发出去:

$$\begin{cases} q = h_e(T_a - T_e) + \sigma(T_{ar}^4 - T_u^4) \\ q = h_e(T_b - T_e) + \sigma(T_{br}^4 - T_u^4) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_a 、 T_b 为标志区 a 、 b 的实际温度; T_{ar} 、 T_{br} 为标志区 a 、 b 的表观温度。公式(3)右边第一部分 $h_e(T - T_e) = h(T - T_u) + (T - T_{in})/r$ 表示温度为 T 的测量表面通过对流及传热的散热总量,其中 T_{in} 为被测物体内部的温度, h_e 与 T_e 分别代表综合传热系数和等效传热温度;第二部分 $\sigma(T_r^4 - T_u^4)$ 表示温度为 T 的测量表面通过辐射的散热量,其中温度单位为 K, σ 为黑体辐射常数。

根据公式(3)解得:

$$\begin{cases} h_e = \sigma(T_{ar}^4 - T_{br}^4) / (T_b - T_a) \\ q = h_e(T_a - T_e) + \sigma(T_{ar}^4 - T_u^4) \end{cases} \quad (4)$$

式中:环境温度 T_u 已知;表观温度 T_{ar} 、 T_{br} 及实际温度 T_a 、 T_b 可以通过测温原理解得。由于被测量物体向内部的导热热阻通常比表面对流传热热阻大很多,通常在测量环境中可以将等效传热温度 T_e 近似为环境温度 T_u ,等效带来的误差很小,将在后文仿真中分析。

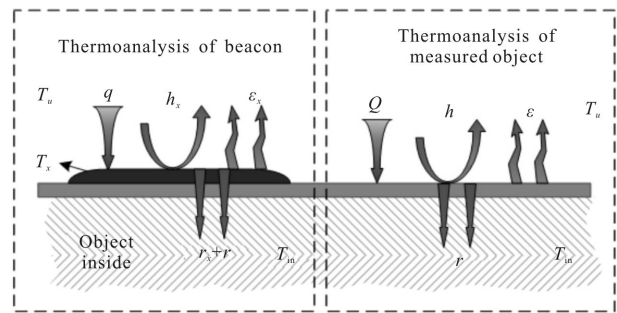


图 4 被测物体及信标的热平衡状况分析

Fig.4 Heat balance analysis of beacon and measured object

信标周围的被测物体表面与信标受到同样的热流密度 q , 因此得到综合传热系数得到综合传热系数 h_e 之后,利用测温方程及热平衡方程可以求得被测表面的实际温度 T_w ,以及被测表面的辐射系数 ε :

$$\begin{cases} T_w = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_{wr}^n - (1-\varepsilon)T_u^n] \right\}^{1/n} \\ q - h_e(T_w - T_u) = \sigma\varepsilon(T_w^4 - T_u^4) \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{wr} 为信标周围被测表面的表观温度,通过红外热相机直接测得。根据解得的被测物体表面辐射率 ε , 就可以计算被测物体表面温度分布 $T(i, j)$ 及热流分布 $Q(i, j)$:

$$T(i, j) = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_r(i, j) - (1-\varepsilon)T_u^n] \right\}^{1/n} \quad (6)$$

$$Q(i, j) = \sigma[T_r^4(i, j) - T_u^4] + h_e[T(i, j) - T_u] \quad (7)$$

式中: $T_r(i, j)$ 为被测物体表面的表观温度分布,通过红外热相机直接测得。

3 热流测量算法验证仿真

利用 MATLAB 数值及图像仿真验证其热流测量算法可行性。仿真流程如下。

3.1 虚拟红外热像仪

根据红外热像仪成像原理,设计参数如下:镜头面积 $A_r=0.0005\text{ m}^2$; 单位测点面积 $A_0=0.0001\text{ m}^2$; 测量距离 $d=3\text{ m}$; 光电感应系数 $R=0.6$; 电压放大系数 $g=5$; 直流电平 $V_0=1\text{ V}$ 。虚拟热像仪的输出矩阵为:

$$I(i, j)=[V(i, j)-V_0]/(A_0 A_r d^{-2} \cdot g) \quad (8)$$

式中: $V(i, j)$ 为热像仪感应电压信号; $P(i, j)$ 为投射在各像素点上的辐射功率。

$$\begin{cases} V(i, j)=g \times [R \times P(i, j)]+V_0 \\ P(i, j)=A_0 A_r \cdot \pi^{-1} d^{-2} \cdot \sigma \{ \varepsilon(i, j) \times T^4(i, j)+[1-\varepsilon(i, j)] \times T_u^4 \} \end{cases}$$

利用上面的公式通过对不同温度的虚拟黑体工况进行虚拟拍摄,能以最小二乘法拟合出虚拟热像仪的刻度函数, $C=1.0829 \times 10^{-8}, n=4$:

$$I_R(T_r)=CT_r^n=1.0829 \times 10^{-8} T_r^4 \quad (9)$$

3.2 构建仿真模型,生成红外图像

3.2.1 热流场初始化

利用函数构建热流分布 $Q(256, 256)$:

$$Q=Q_0 \cdot \sin \sqrt{i^2+j^2} / \sqrt{i^2+j^2} \quad (10)$$

式中: i, j 为分布坐标; Q_0 为基准热流。

生成与红外图像像素规模相等的矩阵,代表热流场的基准强度水平,热流场中各点的热流强度符合 $0.7828Q_0 \leq Q(i, j) \leq 1.9992Q_0$ 。

取 $Q_0=30000\text{ W/m}^2$ 生成的热流场如图 5 所示,图像中间部分的热流最大,向四周外部迅速缩小,这刚好符合高超声速飞行器圆锥形头部的气动加热热流分布,具有很好的代表性。

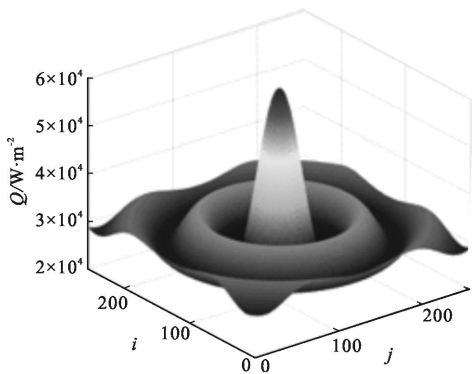


图 5 仿真热流密度分布

Fig.5 Heat flow distribution in simulation

3.2.2 信标及被测物体辐射率

自然界中物体辐射率是随着温度变化的,其变

化规律并不影响文中测量算法的效果,因此假设每种物体的辐射率在温度范围内都是线性变化,引起的误差将在后文分析,符合公式:

$$\varepsilon=\varepsilon_{\text{low}}+(\varepsilon_{\text{up}}-\varepsilon_{\text{low}}) \cdot \frac{T-T_{\text{low}}}{T_{\text{up}}-T_{\text{low}}} \quad (11)$$

模拟工况信标各标志区及被测物体辐射率设置如表 2 所示。

表 2 被测物体表面及信标表面辐射率设计

Tab.2 Emissivity design of measured object surface and beacon surface

	ε_{low}	ε_{up}	$T_{\text{low}}/\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{up}}/\text{ }^\circ\text{C}$
Measured object	0.65	0.85	0	1 000
Area a of beacon	0.15	0.20	100	500
Area b of beacon	0.78	0.82	125	525
Area c of beacon	0.14	0.30	400	1 000
Area d of beacon	0.71	0.79	500	1 000

3.2.3 其他热物理参数

如表 3 所示。

表 3 热流测量的仿真工况参数设计

Tab.3 Simulation design of working condition parameters of heat-flux measurement

Parameter	Value
Environment temperature	$T_e=21\text{ }^\circ\text{C}$
Convective heat-transfer coefficient	$h_c=80\text{ W}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^{-2}$
Object internal temperature	$T_m=70\text{ }^\circ\text{C}$
Thermal resistance of measured object	$r_m=2\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Thermal resistance of beacon	$r_b=0.1\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

3.2.4 拍摄虚拟红外图像

根据热流场分布及各项热物理参数可以求得物体表面温度分布 $T(256, 256)$, 代入公式(8)进行模拟拍摄,得到虚拟红外相机的辐照强度输出矩阵 $I(256, 256)$ 。按照比例压缩为 Unit 8 数据类型得到红外图像如图 6 所示。

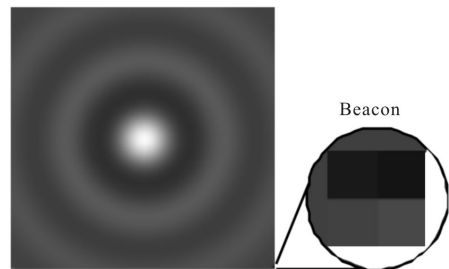


图 6 仿真中模拟拍摄的红外图像

Fig.6 Infrared imagery of measured object in simulation

3.3 热流测量算法验证

3.3.1 红外置标热流测量算法实现

按照第 2 节所述的测量算法处理仿真红外图像,对热流测量信标进行分析,得到被测物体表面温度分布 $T_c(i, j)$ 及热流密度分布 $Q_c(i, j)$ 。

再根据热流分布标准值求得测量误差分布,如图 7 所示,其最大误差 $E_{Q_{max}}=1.79\%$ 。

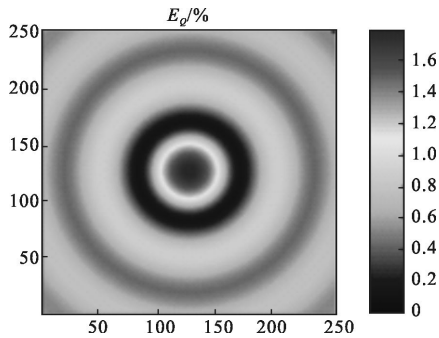


图 7 由热流测量算法得到的热流密度分布及测量误差

Fig.7 Heat flow distribution and measuring error by heat flow measuring algorithm

3.3.2 算法测量误差

下面通过改变工况参数来评估在不同工况下红外置标热流测量的效果。在基准热流 $Q_0=30\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、被测物体辐射率 $\varepsilon=0.65\sim 0.85$ 、对流传热系数 $h=80\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的基础上,分别改变热流、辐射率、传热系数数值,得到测量误差随参数的变化如图 8 所示。

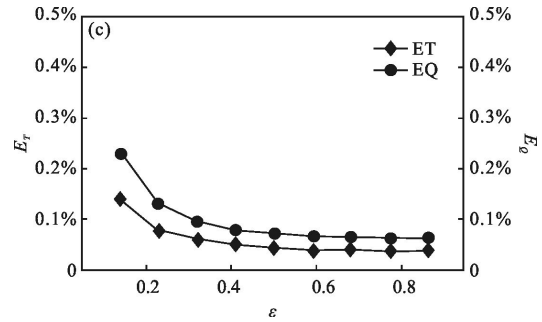
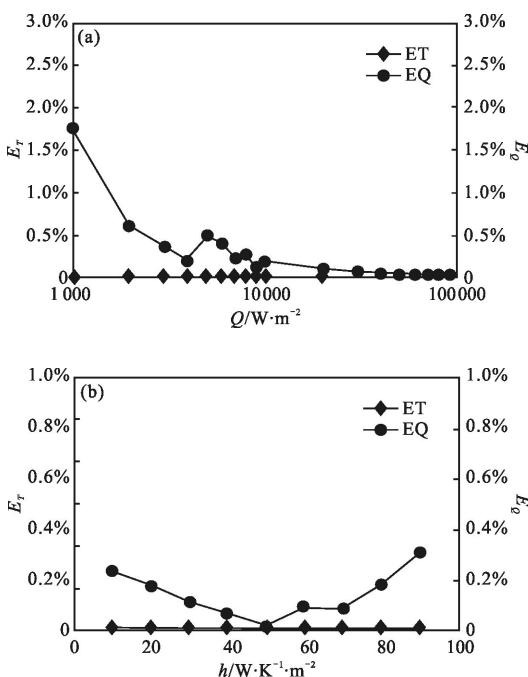


图 8 测量工况各项参数对测量结果误差的影响

Fig.8 Influence of each parameters of test condition on measuring error

三种参数对测量误差的影响在图表中可以反映出来。在改变参数进行仿真测量的过程中,温度测量误差最大为 0.15%,热流测量误差最大为 1.8%,均达到了很好的测量效果。

3.4 误差分析

将公式(7)稍作变换为 $Q=\sigma[T_r^4-T_u^4]+h_e[T-T_e]$,

对其两边求导,根据 $\varepsilon T^4 \approx T_r^4 \Rightarrow dT \approx \varepsilon^{-0.25}dT_r + \varepsilon^{-1.25}T d\varepsilon$ 就可以得到误差公式:

$$E_Q = \frac{4\sigma T_r^4 + h_e T_r \varepsilon^{-0.25}}{Q} \cdot E_{T_r} + \frac{h_e T_r \varepsilon^{-0.25}}{Q} \cdot E_{\varepsilon} + \frac{h_e(T-T_e)}{Q} \cdot E_{h_e} \quad (12)$$

式中:字母 E 表示各参数的相对误差,这样就得到了热流测量结果误差的各项来源,并求出各项误差传递系数。

(1) 辐射率随温度变化带来的误差

仿真测量中,辐射率随温度而变化。但热流测量算法中物体表面辐射率根据信标测得,没有考虑随温度的变化。这样就造成辐射率的误差 E_{ε} ,辐射率误差的传递系数为 $h_e T_r \varepsilon^{-0.25}/Q$,即辐射率的误差会以此倍率传递给测量误差 E_Q 。

根据信标求得辐射率为信标位置温度下被测物体辐射率,测点的温度与信标位置温度差异越大,辐射率误差也越大, $\Delta\varepsilon \propto \Delta T$ 。因此红外图像的整体温差越大,测量的误差也越大。

(2) 灰度图数据结构带来的误差

红外图像的表达形式为灰度图,其数据结构为 Unit 8 型,而红外热像仪输出矩阵 $I(i, j)$ 为 Double 型。通过比例压缩转换为红外图像时,会导致最大为

0.5/256=0.2%的误差。

热流求解算法中利用灰度图求解被测物体的表观温度分布 $T_r(j, i)$, 因此灰度误差会直接影响表观温度误差 E_r , 其误差传递系数为 $4\sigma T_r^4/Q$ 。

(3) 由综合传热系数 h_e 带来的误差

通过分析信标和求解方程组得到的主要参数为等效传热系数 h_e , 以数值仿真测量为例, 算法测得的 h_e 与实际值有 $E_{he}=1.54\%$ 的误差, 这些误差将以 $h_e(T-T_e)/Q \approx 0.83$ 的传递系数造成热流测量结果的误差。

4 结 论

通过上述分析, 可以得出以下结论:

(1) 针对极端工况大热流密度的测量问题, 提出了一种基于红外热图技术, 借助热流测量信标的新型热流测量方法。

(2) 根据提出的红外信标热流测量理念及原理, 设计了详细可行的红外图像处理算法和红外置标热流测量算法。

(3) 通过 MATLAB 的图像处理和矩阵计算能力, 对热流测量算法进行了数值仿真验证。热流测量仿真结果误差在 2% 以内, 证明了红外置标热流测量的可行性。

(4) 红外置标热流测量技术原理简单, 背景知识成熟, 结合了接触式测量及非接触式测量的优点, 操作简单, 测量准确, 是一种适用广泛较为理想的热流测量方法。

参考文献:

- [1] Berry S A, Horvath T J, Schwartz R, et al. Infrared imaging of boundary layer transition flight experiments [C]//40th AIAA Thermophysics Conference, 2008: 2008-4026.
- [2] Berry S A, Chen F J, Wilder M C, et al. Boundary layer transition experiments in support of the hypersonics program [C]//39th AIAA Thermophysics Conference, 2007: 2007-4266.
- [3] Zhang Hailin, Zhou Lin, Zuo Wenbo, et al. Study on infrared radiation feature of near space hypersonic missile[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1): 41-44. (in Chinese)
张海林, 周林, 左文博, 等. 临近空间高超声速导弹红外特性研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(1): 41-44.
- [4] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3145-3153.
- [5] Astarita T, Cardone G, Carlomagno G M, et al. A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(7): 593-610.
- [6] Ding Weiyi. Research on key technologies and algorithms of temperature measurement system of uncooled infrared thermal imaging [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
丁维一. 非制冷红外热成像测温系统关键技术和算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [7] Chen Qian. The status and development trend of infrared image processing technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 311-318. (in Chinese)
陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势 [J]. *红外技术*, 2013, 35(6): 311-318.
- [8] Mei Lin, Hou Chenggang, Wang Yuwen. Infrared image acquisition and processing system based on Windows environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(3): 33-36. (in Chinese)
梅林, 侯成刚, 王裕文. Windows 环境下红外图像采集和处理系统 [J]. *红外与激光工程*, 1999, 28(3): 33-36.