

文章编号: 1007-3124(2001)01-0043-05

用于高温测量的红外热成像技术

邓建平¹, 王国林¹, 黄沛然²

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2. 华中理工大学, 湖北 武汉 430074)

摘要 用于高焓风洞实验中模型表面温度测量的 CCD 红外热成像系统, 测温范围 1000 ~ 3500K。笔者介绍系统原理和标定过程, 并给出了初步风洞实验结果。通过与红外高温计测量结果的比较分析, 验证了该系统的可靠性和实用性。系统的研制成功为地面防热/热结构实验中模型表面温度测量提供了先进的手段。

关键词 CCD 红外热像仪 高温测量 高焓风洞 计算机图像处理 风洞实验

中图分类号 TK311 **文献标识码** A

The IR thermography technique for high temperature measurement

DENG Jian-ping¹, WANG Guo-lin¹, HUANG Pei-ran²

(1. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China; 2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A CCD IR thermography system can be used to measure the model surface temperatures up to 3500K. In this paper, the system calibration test and dynamical compare test are introduced. The surface temperatures distribution of the hemispherical and small blunt model in high enthalpy facility are measured by the CCD IR thermography system. The results are compared with that obtained by an infrared pyrometer. It indicates that the developed system is successful and it will play an important role in high enthalpy wind tunnel experiment.

Key words CCD IR thermography; high-temperature measurement; high-enthalpy facility; computer images process; wind tunnel experiment

0 引言

在地面防热/热结构试验中, 模型表面温度高达 2000K 以上, 通过测量实验过程中模型表面温度变化可以分析防热材料的烧蚀性能和防热结构的可靠性, 从而为飞行器防热材料的筛选和防热结构的设计提供依据。弹头再入过程中的表面温度分布也是突防设计需要获取的重要参数之一。常用的热电偶和红外测温仪只能给出模型表面的单点温度值。过去所发展的红外热像仪测温技术也仅限于常规风洞实验中的中、低温度(1000K 以

收稿日期 2000-03-02

基金项目 国防科技预研基金资助项目

作者简介 邓建平(1966-), 男, 江西萍乡市人, 中国空气动力研究与发展中心高级工程师。

万方数据

下)测量^[1~3],为了满足电弧风洞等高焓设备实验测量的需要,研制了一套测温范围在1000~3500K的红外热像仪及图像处理系统,目前该系统已完成标定并在我部高频等离子体风洞中进行了实验,获得了较满意的结果。

1 红外热成像系统的构成与测温原理

1.1 系统构成

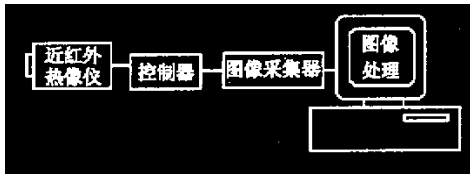


图1 红外热成像系统示意图

Fig.1 The schematic of IR thermography system

该系统主要由近红外热像仪、控制器、视频图像采集器和图像处理软件四大部分组成(图1)。近红外热像仪采用日本高分辨率能工作于近红外波段的硅 CCD 面阵探测器。系统使用了红外滤光片以减少背景可见光的干扰,同时使用中性衰减片变换量程范围,其主要技术指标为:灵敏度 0.021lx (未加滤光片);光谱响应范围 $0.8 \sim 1.1\mu\text{m}$;图像分辨率 790×590 ;空间分辨率 500 ;电视线 300 ;镜头视场角: 25° ;变焦范围 $5 \sim 70\text{mm}$;测温范围 $1000 \sim 3500\text{K}$ 。视频图像采集器将红外热像仪输出的电压信号动态捕捉并转换成视频文件,采集速度 12F/s 或 25F/s 。图像处理软件负责完成将采集到的视频文件转换为通用的位图文件以进行图像信息的分析、数据处理和结果输出。

1.2 测温原理

红外热成像测温原理以普朗克辐射定律理论为基础,利用光电转换技术将物体表面的热辐射能转换成探测器的输出电平信号,该输出电平信号与所接收的辐射能可以用下式来表示:

$$V_s = W(\lambda, T) A_0 \tau_0 R \quad (1)$$

式中: V_s 、 A_0 、 τ_0 、 R 分别为探测器输出电平信号、光学系统上的有效孔径、光学系统透过率及响应度; W 、 λ 、 T 分别为探测器所接收的辐射能、响应波长和被测目标的温度。其中:

$$W(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T, \theta) C_1 \lambda^{-5} / (\exp(C_2/\lambda T) - 1) d\lambda \quad (2)$$

式中: ϵ 、 θ 为目标发射率和方向角; C_1 、 C_2 为第一、二辐射常数。对于同一红外热像仪,其光谱波段和 A_0 、 τ_0 、 R 已固定,故 V_s 与 T 为一一对应的关系。

一般,最终所得的数据是包含不同灰度等级的图像信息,因此只要通过标定找到灰度 D 与电平信号 V_s 的函数关系

$$D = f(V_s(T)) \quad (3)$$

就能最终确定被测目标的表面温度。

2 系统标定

标定实验通过高温黑体炉来完成,根据辐射传热理论可知,CCD 红外探测器接收到的能量(W)包括被测目标辐射能量(W_t)、目标周围环境的辐射能量(W_s)和目标所反射的能量(W_r)。因此,只要通过标定找到灰度 D 与电平信号 V_s 的函数关系,就能最终确定被测目标的表面温度。

量(W_r),即:

$$W(\lambda,T) = W_t(\lambda,T) + W_s(\lambda,T) + W_r(\lambda,T) \tag{4}$$

在标定时,由于黑体炉的温度远大于环境温度(室温),可以忽略环境温度对标定的影响,因此 CCD 红外探测器所接收到的能量仅仅是被测目标的辐射能量。标定实验装置如图 2 所示,实验时用红外高温计测量出黑体炉温度,同时用红外热像仪采集到相应的红外热图,经处理便可得到最终的标定曲线(灰度与温度的关系曲线)。为了提高测量精度,标定过程中通过变换系统内置的中性衰减片来控制光通量的大小,将整个系统分为 1000 ~ 2000K、1000 ~ 2500K、1000 ~ 3500K 不同的测温档。实际获得的温度 - 灰度曲线如图 3 所示。

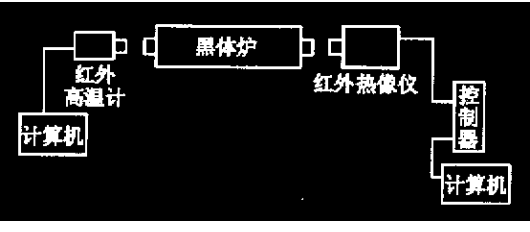


图 2 标定实验装置示意图

Fig.2 Schematic of calibration arrangement

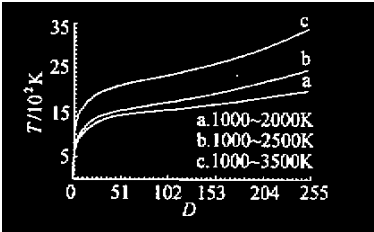


图 3 红外热像仪三个测温档标定曲线

Fig.3 The calibration curves of IR thermography system

3 风洞实验

考核实验在我部的高频等离子体风洞^[4]中进行,实验装置如图 4 所示。实验模型采用石墨材料加工的半球头模型和小钝锥模型。

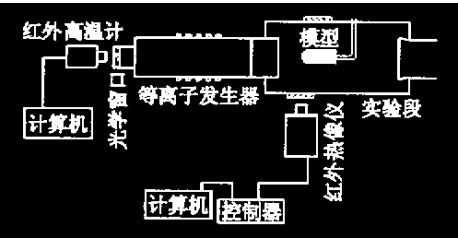
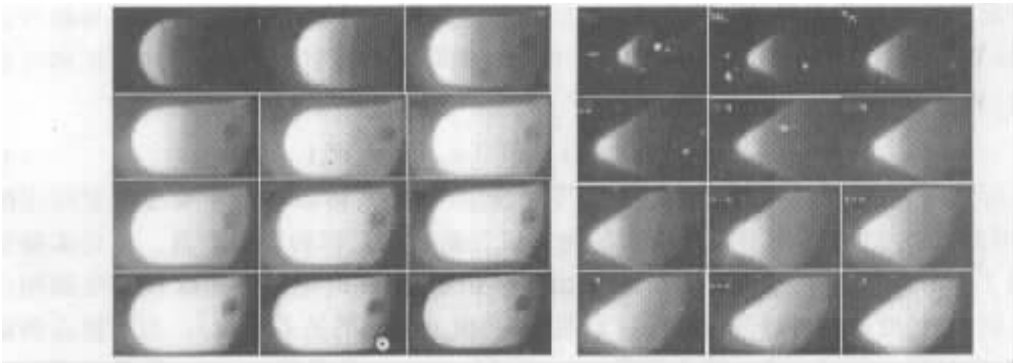


图 4 风洞实验装置示意图

Fig.4 Schematic drawing of wind tunnel test arrangement

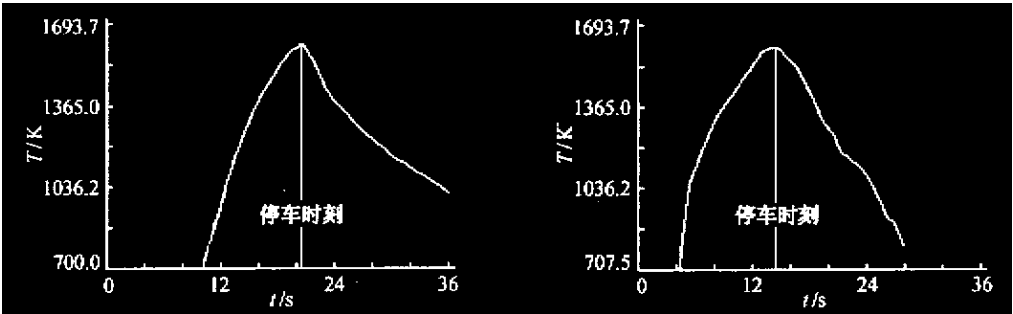
风洞在亚声速状态下运行,驻点焓值 10MJ/kg 驻点压力 3.5kPa,每次运行时间约为 50s。实验中红外热像仪通过安装在实验段侧壁的光学观察窗对整个模型表面的温度分布进行测量,为了减少因观察窗透过率所带来的测量误差,事先将观察窗与整套红外系统一起进行标定。同时通过发生器前端的光学观察窗口用红外高温计测量出模型驻点温度,以便和红外热像仪测量结果进行比较。图 5 是半球头模型和小钝锥模型实验过程中不同时刻的红外热图照片,模型加热时间分别约为 20s 和 14s,每图之间的时间间隔为 2s。模型驻点温度随时间变化曲线分别见图 6 (a)和(b),图 7 给出了停车后红外高温计和红外热像仪测量的半球头模型和小钝锥模型驻点温度随时间变化曲线(以停车时间为 0 点),将停车后的表面温度变化作为比较,是为了消除高温气流对测量结果的影响。从图中可知二者相差不到 3%,说明了红外热像仪测量结果的可靠性。



(a) Hemisphere model (b) Small blunt model

图 5 两种模型在实验不同时刻的红外热图

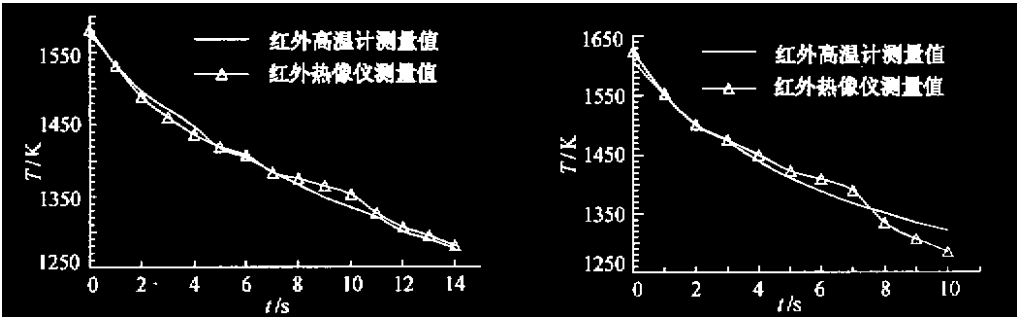
Fig.5 The IR images of models



(a) Hemisphere model (b) Small blunt model

图 6 两种模型驻点温度随时间变化曲线

Fig.6 The curves of stagnation temperatures change with time for two models



(a) Hemisphere model (b) Small blunt model

图 7 两种模型驻点温度随时间变化对比曲线

Fig.7 The compared curves of stagnation temperatures

图 8 给出了热像仪测得的半球柱模型离驻点 12mm 处纵截面温度分布结果。理论上,在流场均匀的条件下,模型同一截面上的温度分布应该相同,但从实际测量的结果中可知,模型边缘的温度比中心低了近 20%,这说明当方向角 θ 较大时,红外热像仪所得的数据必须进行修正^[5],模型的发射率还与模型材料、表面粗糙度和流场本身的特性有关,必须通过详细的实验才能确定,这一工作有待今后进一步研究。

4 结 论

(1)对研制的基于硅 CCD 面阵探测器的高温红外热像仪系统进行了标定和动态对比实验,测量结果与红外高温计一致,证明研制的红外测温系统是成功的。

(2)本系统能够同时给出模型表面温度随时间和空间的分布,测量的最高温度达 3500K,能够用于电弧风洞等高焓设备实验的模型表面温度测量,为防热/热结构实验和其它高焓风洞实验提供了有效的测量手段。

(3)今后要通过实验进一步研究有关方向角、发射率和模型周围流场等因素的影响,以提高测量的精度。

参考文献：

[1] BOYD LS. Analysis of infrared thermography data for icing applications. AIAA91-0666.
[2] ROBAT Chenry. Infrared technique to measure the skin temperatures on an electrothermal DC-Icer comparison with numerical simulations. AIAA89-0760.
[3] KAMRAN Daryabeigi. Global surface temperature/heat transfer measurements using infrared imaging. AIAA92-3959.
[4] 邓建平,邱卫东,张科,余康. 高频等离子体风洞研制. 首届青年气动工作者学术报告会,1997.9.
[5] 曹玉璋,黄素逸等译. 热辐射传热学. 北京 科学出版社,1990.

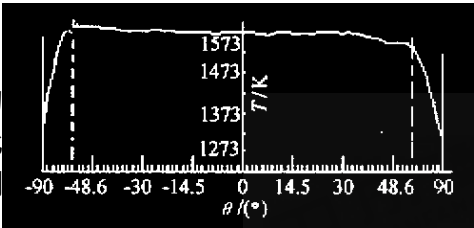


图 8 距半球头驻点 12mm 纵截面温度分布曲线

Fig. 8 The vertical section temperature distributions
12mm to stagnation