

动态高温温场测量装置研究

严兵¹, 李建彬², 孙红胜³, 张虎³, 李世伟³, 魏建强³, 任小婉³

(1. 海装天津局, 北京 100073;

2. 海军驻北京地区舰空导弹系统军事代表室, 北京 100854;

3. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: 在航天用试验件进行风洞加热热试验时, 试验件表面特定区域的温度可达 1 700 ℃ 甚至更高, 对这种动态变化的区域温度场测量难度较高, 一般只能使用成本昂贵的测温型红外热像仪实现, 且对恶劣环境适应性不高。采用比色温度测量模型, 选用近红外波段 900 nm 附近两个波长作为测量波长, 采用高动态响应 CCD 成像器件作为信号采集设备, 保证了两个测量通道采集图像在空间上的对应, 实现了测量区域内温度分布的测量, 测量帧频最高可达 40 Hz, 测量准确度小于 6%。

关键词: 高温; 温场测量; 动态测量; 比色

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1312-04

Dynamic high temperature field measurement device

Yan Bing¹, Li Jianbin², Sun Hongsheng³, Zhang Hu³, Li Shiwei³, Wei Jianqiang³, Ren Xiaowan³

(1. Tianjin Bureau of China Naval Equipment Ministry, Beijing 100073, China;

2. Air-ship Missile Military Representative Office of Navy in Beijing, Beijing 100854, China;

3. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China)

Abstract: On thermal test of aerospace research filed, wind tunnel is usually used for heating the sample up to 1 700 ℃. It is very difficult to measure dynamic temperature filed without using the expensive and non-flexible temperature metrical IR-camera. Based on colorimetric model, two selected near-infrared wavelengths near 900 nm were used and a high dynamic response CCD device was hired. Mechanic and optical design guaranteed space synchronization of collected images of two measurement tunnel. The device achieved temperature filed measurement, frame rate is up to 40 Hz, and the measurement accuracy is less than 6%.

Key words: high temperature; temperature field measurement; dynamic measurement; colorimetry

0 引 言

对飞行器材料与结构进行风洞加热试验和其他地面热试验时,需要在风洞吹风加热或辐射加热时对受试件表面的高速动态高温温场进行准确的测量,得到结构件在某一区域的高温瞬态温场分布,通过试验计算结果考核材料和结构的热强度,以优选出相应的高速飞行器结构与热防护用耐高温材料^[1]。同时,在冲压发动机、耐高温材料热物性研究领域,获取被测物表面的瞬态高温温场分布,也具有十分重要的意义。

因此,建立一套动态高温温场测量装置,为结构与热防护材料选择提供基础研究和热试验时的测量手段,具有重要的意义。同时,利用所积累的经验和技术,还可推广到广泛的工业用测温领域,为工业生产制造提供有效的温度测量手段^[2]。

1 动态高温温场测量装置总体设计

利用两个探测器对被测物面进行单色成像,通过比色方法进行温场测量,得到整个被测物面的温场分布。该方法中,必须要考虑的是,作为面测量的测量方法建模中,必须使得整个面上不同温度点时各比色波长辐射透过大气和杂质时,其透过率保持中性,否则产生的误差较大;这点可通过对比色波长的精心设计来保证,国内外都有相关的成熟设计经验^[3]。测量装置原理图如图 1 所示。系统主要由双色成像系统,系统控制与数据采集融合系统、软件专家系统等部分组成。根据要测量的温度范围,双色系统采用两个精心设计的比色波长,可有效消除环境杂质及反射的影响,提高测量准确度。

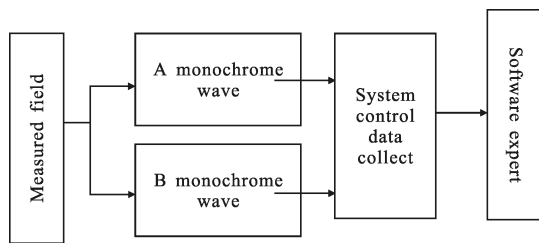


图 1 测量标准装置原理框图

Fig.1 Principle diagram of measured standard device

系统总体设计图如图 2 所示,被测目标的辐射

能量经保护窗口入射到测量系统中,经分光镜分成波长不同的两部分,分别进入两路信号采集光路,在入射到可见光 CCD 之前经滤光片滤成带宽很窄的单色光。CCD 探测器将接收到的辐射光信号转化为电信号输出,经图像采集卡采集送至工控机通过系统软件进行分析、处理。

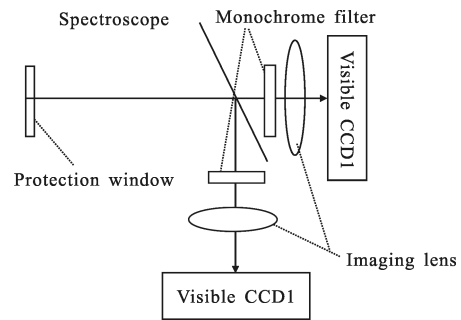


图 2 动态高温温场测量标准装置总体设计图

Fig.2 Overall figure of standard device dynamic high temperature field

采用以上的标准装置设计方案,并根据测量方法,编写专门的专家系统软件,软件测量包括采用以上的标准装置设计方案,并根据测量方法,编写专门的专家系统软件,软件测量包括标准和特殊两个模式。

标准模式中,假设被测物体为灰体,特殊模式中,可设定被测目标在比色波长处的发射率比值。软件具有点、线、面等专门的处理功能,可生成报表、图像、测试结果表格等多种数据结果文件。软件拟采用 VC++ 进行编写,系统软件的技术方案如图 3 所示。

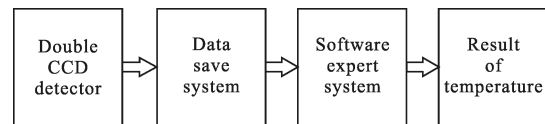


图 3 用于数据后期处理的软件专家系统

Fig.3 Software expert for data processing

2 分系统设计

2.1 光学系统

该系统采用比色测温原理,通过两个不同的通道接收被测目标不同波长下的辐射信息,通过比色测温理论模型,找到目标温度与两通道输出信号强度比值之间的关系,从而消除发射率的影响,提高测量准确度。分光片采用特殊镀膜设计,对 0.85 μm 以

下的辐射高反射,对 0.85 μm 以上的辐射高透过,可做到每个通道通过率高于 85%,能量损失较小。窗口选择普通的 K9 保护窗口。两个测量通道分别选用了中心波长为 800.9 nm 和 949.1 nm 的滤光片,透射光半宽度分别为 14.6 nm 和 15.3 nm。装置中使用的分光片和滤光片都已经送至中国计量院进行了检定,保证测量模型中光谱参数的准确,从而保证测温的准确度。

2.2 信号采集系统

该装置应用于 1 000~2 000 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围,高温端和低温端信号强度差别很大,需要信号采集系统具有较宽的动态范围^[4]。温度场动态测量的设计要求信号采集系统能够对被测目标进行实时成像,且具有较高的采集帧频。此外,为保证较好的测量结果准确性和重复性,需要信号采集系统输出响应有较好的线性和灵敏度。经反复试验,前期选型的嘉恒中自公司的 AM1105 型 CCD 无法在动态范围上满足要求,只能覆盖到约 1 000~1 700 $^{\circ}\text{C}$ 。最终选定了 AM1530 型 CCD,能够满足该课题的设计需求。技术指标如下:

(1) CCD 传感器尺寸为 2/3 in; (2) 有效像元数为 1 024×1 024; (3) 灵敏度为 0.04 Lux; (4) 最大曝光时间为 7.9 s(外触发模式)。

2.3 调节机构

在比色测温法中,需要精确得到每个通道中接收到的同一被测目标的辐射信号,才能通过比色测温模型得到较为准确的结果。考虑到在该课题中对被测目标温度场测量的需要,被测目标不同点处的温度是通过采集 CCD 采集到图像上的灰度数据计算得到。而在软件算法中,判断不同点的依据是测量点在图像上的坐标^[5]。因此需要保证两个测量通道采集图像能够重合,才能保证被测目标点在两个通道所成图像上的坐标相同。在实际中,两个测量通道由于光路装调、机械机构安装尺寸偏差等因素的影响,所成图像并不能完全重合,因此需要调节机构调节分光片位置,以保证两个通道成像位置相同。

针对系统需求设计了调节机构,能够在水平和垂直两个方向实现对分光片的微调,并设计了锁紧装置。满足了系统设计需求。

2.4 测量理论模型

测量理论与标定数学模型根据要测量的温度范围,双色系统采用两个精心设计的比色波长,可有效

消除环境杂质及反射的影响,提高测量准确度。假设选取的比色波长中,波长 1 为 λ_1 ,带宽为 $\Delta\lambda_1$,选取的波长 2 为 λ_2 ,带宽为 $\Delta\lambda_2$ 。

则被测目标点在两个波长处的光谱辐射亮度比值不考虑带宽时为:

$$R = B_2/B_1 = \left\{ \lambda_1^5 [\exp(C_2/\lambda_1 T) - 1] \right\} / \left\{ \lambda_2^5 [\exp(C_2/\lambda_2 T) - 1] \right\}$$

$$R = \left\{ \int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda} \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T') - 1]^{-1} d\lambda \right\} / \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda} \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T') - 1]^{-1} d\lambda \right\}$$

对于短波辐射,可应用维恩公式替代普朗克公式,则上式变为:

$$R = \left\{ \int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda} \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T') d\lambda \right\} / \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda} \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T') d\lambda \right\}$$

项,对上式进行简化可得:

$$R = \exp\left\{ \frac{C_2}{T'} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right\} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 (1 + 2.5\Delta\lambda/\lambda_1 - 2.5\Delta\lambda/\lambda_2)$$

比色测温时 1, 2 两个通道中心波长分别为 λ_1 , λ_2 , 带宽分别为 $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ 。最终考虑到滤光片的带宽后,标准装置测量真温的计算公式为:

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}{\ln \frac{B_2}{B_1} + \ln C + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \left(1 - 2.5 \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} + 2.5 \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} \right) + \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$$

式中: $\lambda_1 = 800.9$ nm, $\Delta\lambda_1 = 29.2$ nm; $\lambda_2 = 949.1$ nm, $\Delta\lambda_2 = 30.6$ nm; B_2/B_1 为两个通道图像在同一像素点的灰度之比; C 为标定常数,满足关系,通过标定得到; $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ 为 λ_1, λ_2 波长处的发射率之比; C_2 为第二辐射常数, $(1.438\ 786 \pm 0.0000\ 45) \times 10^7$ nm·K。

测量标准装置硬件装置需完成对被测目标两个单色波长的成像,并要求两幅单色图像为同时采集。设计的两个比色波长为 800.9 nm 和 949.1 nm,避开大气和水汽的吸收峰,同时测量灵敏度较高。备用的一个比色波长为 960 nm,可利用旋转定位机构进行灵活选择。

分光镜采用特殊镀膜设计,对 0.85 μm 以下的辐射高反射,对 0.85 μm 以上的辐射高透过,可做到每个通道通过率高于 85%,能量损失较小。窗口选择 K9 玻璃保护窗口。

动态高温温场标准装置的温度测量方法是先通过调节机构调节两个测量通道成像位置至重合,调

节 CCD 快门时间, 使目标成像灰度保持在 CCD 线性度相对较好的中间段, 一般选取灰度值为 80~220 之间的范围。打开系统软件采集 CCD 图像数据, 将采集到的灰度信息数字化后处理后代入比色测温理论模型^[6], 计算出目标温度。测量前所有设备都要先检查仪器外表是否有划伤, 开机显示是否正常, 线缆连接是否正确, 然后再进行预热, 预热完成后才能对仪器进行测量操作。

3 测试试验

使用该装置对加热温度可达 1 600 °C 的高温加热炉进行了测试试验。高温加热炉自带经过校准的测温热电偶作为参考标准, 测试试验数据如表 1 所示, 测试试验采集图像如图 4 所示。

表 1 测试试验数据

Tab.1 Measured data

No.	Temperature/°C	Display/°C
1	930	929
2	1 060	1 064
3	1 160	1 166
4	1 262	1 264
5	1 351	1 348
6	1 464	1 466
7	1 552	1 544
8	1 651	1 646
9	1 754	1 747
10	1 857	1 857
11	1 961	1 958
12	2 057	2 047
Temperature range		930~2057 °C

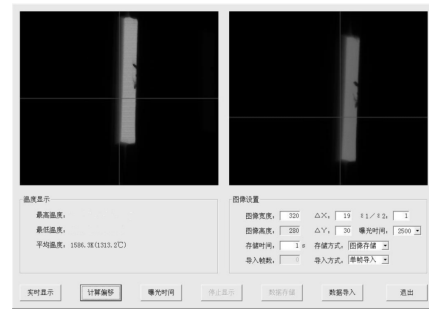


图 4 测试试验采集图像

Fig.4 Acquisition image of test

4 结 论

该装置以比色测温理论模型为基础, 采用了高帧频的 CCD 成像器件设计信号采集系统, 通过机械设计和光学设计保证了两个测量通道采集图像在空间上的一致性, 实现了对高温目标温度场的高帧频测量, 能够适用于恶劣试验环境下温度场快速变化的高温目标的区域温度测量^[7]。

参 考 文 献:

- [1] Gathers G R. Analysis of multiwave length pyrometry using nonlinear chi-square fits and Monte Carlo methods [J]. *International Journal of Thermophysics*, 1992(3): 50-55.
- [2] Liu Yingqi. Inversion of temperature distribution of space target infrared multi band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 3(1): 10-12. (in Chinese)
- [3] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18-24. (in Chinese)
- [4] Zhang Baosheng, Jiao Xiangdong, Lv Tao, et al. High temperature measurement technology and its application in the welding [J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2006(2): 22-23. (in Chinese)
- [5] Wang Yutian, Yang Lili, Lu Xinqiong. Transient high temperature measurement system [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010(3): 45-46. (in Chinese)
- [6] Deng Xingkai, Yang Yongjun. Application and development of CCD multispectral radiation thermometry [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011(1): 101-102. (in Chinese)