

文章编号:1002-2082(2009)06-1024-04

双通道数字红外辐射计的研究

刁建宏¹, 武 秦¹, 曾祥忠²

(1. 航天科工集团二院二零所, 陕西 西安 710065;

2. 西安中川光电科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:针对目前所使用的红外辐射强度测试系统的不足,提出双通道数字红外辐射计的方案,即在同一红外辐射计中设计两套相互独立的红外辐射强度测试通道,在红外辐射产品点火试验测试中,双通道测试同时工作,同时进行数据采集。用研制的双通道数字红外辐射计分别在室温(25℃)和低温(-15℃)条件下进行6次对比试验,结果表明:两系统测试的误差小于5%,双通道数字红外辐射计两通道之间误差小于5%,原1905A测试系统出现2次漏测,双通道数字红外辐射计无漏测。

关键词:双通道数字红外辐射计;误差分析;标定参数

中图分类号:TN21-34

文献标志码:A

Double-channel digital IR radiometer

DIAO Jian-hong¹, WU Qin¹, ZENG Xiang-zhong²

(1. The 210 Institute of Airspace Technology Co., Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Mid-river Photo-electric Technology Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The double-channel digital IR radiometer was developed for eliminating the disadvantages of the IR radiance testing system being used in testing some military infrared products. The double channels simultaneously test the IR radiance and connect the data when the ignition test of an IR radiation product is carried out. Six contrast experiments between the double-channel digital IR radiometer and IR radiance testing system were performed at 25℃ and -15℃. The result indicates that the error of the two systems are all less than 5%, and the difference of the two channels of the double-channel digital IR radiometer is also less than 5%. But 1905A testing system missed out twice and the radiator did not omit anything. The principle, design of key components, calibration and application are discussed in this paper.

Key words: double-channel digital IR radiometer; error analysis; parameter calibration

引言

在军用红外辐射产品研制、生产中,产品的红外辐射强度测试是产品出厂交付的重要环节,其目的是测试产品在特定红外波段内的辐射强度是否符合设计指标要求。1905A红外辐射强度测试系统存在以下不足:1)测试系统为单通道,当测试数据出现异常时,无法判定是测试系统本身的问题,还是产品的问题,测试结果的准确性和可信度

因此受到质疑。这是因为,按照标准要求火工产品测试试验均在空旷试验场地进行,在正式试验前的联试中只能对测试系统进行定性检验,如果某一环节出现问题,联试中又不能发现,在正式试验则造成测试结果异常,甚至漏测。2)测试系统采用数字电压表作为记录设备,一方面无法同时记录开始产品点火的系统信号,另一方面数据采集频率低(1 Hz),数据量小(最多只能记录60个数据),无法

收稿日期:2008-10-13; 修回日期:2009-03-18

作者简介:刁建宏(1965—),男,重庆江津人,高级工程师,主要从事红外测试技术等方面的研究工作。

满足产品设计人员分析要求。

随着高质量、高可靠性红外辐射产品的研制,对辐射强度的测试提出了更高的要求。鉴于目前所使用的红外辐射强度测试系统的不足,本文提出双通道数字红外辐射计的方案,即在同一红外辐射计中设计两套相互独立的红外辐射强度测试通道,在红外辐射产品点火试验测试中,双通道测试同时工作,同时进行数据采集,以同一个时钟信号为起点。测试时以一个通道为主测试,另一个为辅测试;当主测试通道数据出现异常时,可采用备份通道的数据作为测试数据,也可将两通道数据进行对比,以增加测试结果的准确性和可信度。本文将对双通道数字红外辐射计的工作原理、设计要点、系统误差、产品标定以及实用效果进行论述。

1 工作原理

就一个通道而言,双通道数字红外辐射计的工作原理(图1)与单通道一样。系统采用同一个斩波器对两通道红外线光进行调制,2个通道设计独立的红外探测器、前置放大、锁相放大,双通道 A/D 转换,RS-422 标准串行数据输出,从而实现双通道红外辐射测量。利用专用软件实现数据采集、处理、显示、转化、存储和打印等。

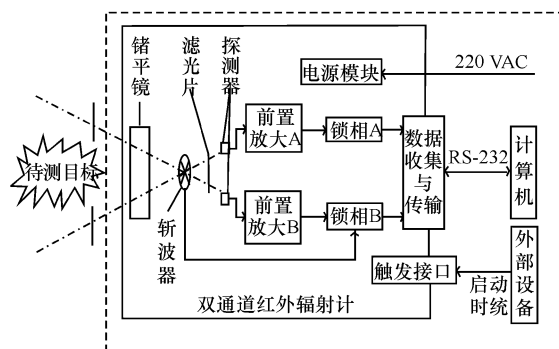


图1 双通道红外辐射计原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of double-channel digital IR radiometer

2 关键设计

2.1 红外探测器的选择与红外滤光片

红外探测器采用光伏型非制冷型常温工作红外探测器 Hg-Cd-Zn-Te, 其响应波长为 $2\ \mu\text{m} \sim 14\ \mu\text{m}$, 2个探测器并列放置, 中心间距离为 10 mm。每只红外探测器前安装一红外滤光片。设计时考虑实用需求, 将红外滤光片设计成可以更换的部件, 2个通道的红外滤光片特性可以一致, 也

可以不一致。例如, 一个通道安装透过波段为 $8\ \mu\text{m} \sim 14\ \mu\text{m}$ 的红外滤光片, 另外一个安装透过波段为 $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 红外滤光片, 即可实现双波段红外辐射的同时测试。图2为采用本文红外滤光片的透过曲线。

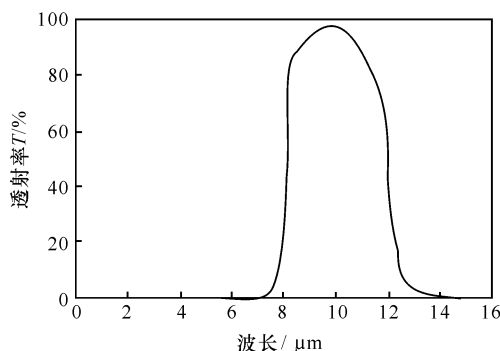


图2 红外滤光片的透射曲线

Fig. 2 Spectral transmittance of IR Filter

2.2 双通道斩波器设计

双通道数字红外辐射计中要求斩波器具有相同的斩波频率、斩波相位和占空比。斩波器设计为圆型盘, 以圆盘圆心设计2个间距为 10 mm 的同心圆, 这2个同心圆上相同的方向均布 16 个圆孔, 两圈圆孔的直径满足公切线要求。斩波器在电机带动下旋转时, 双通道的斩波频率、斩波相位和占空比都相同。斩波频率设计为 1 kHz, 由此计算出电机的转速为 3 750 r/min。

2.3 双通道数字锁相放大器设计

进入锁相放大器前(信号幅度为 500 mV)的交变电信号, 包含背景及电子漂移的直流成份。红外目标信号和斩波器的相位信号同时进入锁相放大器, 目标信号先被相位信号触发采集, 分别对波峰和波谷信号进行同相采集, 然后进入模拟减法器, 输出反映波峰与波谷差的直流电压信号。该信号即将环境与产品本身造成的各种电子漂移消除, 仅仅反映待测红外辐射源的信号。双通道数字红外辐射计所采用的锁相放大器为双通道同相数字锁相放大器, 高速单片机实现对斩波频率与相位的精确自动跟踪, 可有效消除斩波器电机转速不稳带来的影响, 同时也降低了对斩波器电机的技术要求。

2.4 其他功能设计

本文的数字双通道红外辐射计的探测头部分为一体化设计, 包括所有光学系统、调制、锁相放大、A/D 转换、传输单元。探测头部分与计算机之间采用控制指令与数据的传输(传输采用 RS-422 标准, 传输距离远, 抗干扰能力强); 两路前置放大器采用具有 J-FET 结构的放大器, 以便得到高的

输入阻抗,低的零点漂移,保证前端输出信号的可靠性和准确性,提高前级的抗干扰能力;数据采集器共有3个采集通道,2个通道为数据采集通道,1个通道为系统诊断自检通道,A/D分辨率为12 bit,每通道采集频率为50 Hz;探测头和附件可以装在铝合金箱中,方便携带和搬运;探测头还设计有与标准三角架安装的接口及红色激光瞄准指示。

该双通道数字红外辐射计的软件为专用软件,包括测量控制、数据处理、产品标定3大模块,可以运行于WindowsXP/Windows2000/WindowsNt等操作系统。

a) 测量控制实现对RLK600探测头的控制和数据采集。具体功能包括:

- * 打开/断开连接,自检探测头工作参数(锁相放大相位、通道放大倍数);

- * 启动/停止数据采集、采集时间选择、数据自动命名与存储、自动备份数据;

- * 实时显示采集数据和图形、探测头工作状态指示。

b) 数据处理实现对采集的数据进行处理和标定。具体功能包括:

- * 可打开3种数据文件(原始数据备份、正式试验数据、标定后数据);

- * 数据预处理(截取、滤波、恢复),自动去除背景、自动完成标定;

- * 多种方式图形显示(单通道、原始数据/去背景数据/标定后数据,放大/缩小);

- * 标定参数文件读入/修改/重新标定,数据EXCL格式输出。

c) 根据采集标准黑体的数据,自动计算产品标定参数,形成标定文件,供数据处理使用。

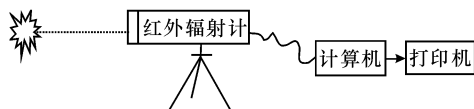


图3 双通道红外辐射计应用系统

Fig. 3 Application system of double channel digital IR radiometer

3 误差分析

红外辐射计测量误差或精度,一般由准确度和不确定度2个指标来衡量。准确度表示测量结果与理论值的差,影响准确度的主要因素有不确定度、

标定系数、测量环境(温度、湿度、海拔高度等),它们引起大气透过率变化和测量过程中瞄准误差。不确定度表示测量结果的离散度及仪器的稳定性,仪器稳定性越好,即仪器本身的随机误差小。

对于双通道红外辐射计,测量误差除了上述准确度和不确定2个指标外,还有一个重要的误差指标,即2个通道之间一致性误差。本文仅对2个通道之间测量一致性误差进行理论分析。

图4中 d 为2个通道传感器之间的距离, L 为测量工作距离, D 为每个通道测量视场的直径。假设目标的红外辐射均匀并充满整个测量视场,则每个通道测量的红外辐射强度与视场成正比,2个通道之间测量结果的一致性误差与2个通道测量视场的非重叠部分面积成正比,即通道间一致性误差=非重叠部分面积/视场面积。

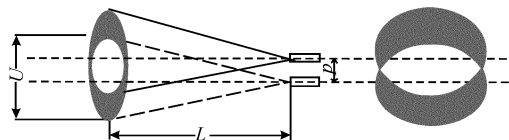


图4 测试范围差异造成的两通道间误差

Fig. 4 Error caused by different testing area

4 双通道红外辐射计的标定

双通道红外辐射计的标定与单通道外辐射计的标定一样,通过对已知温度的黑体进行数据采集,按照公式计算出对应的黑体在指定波长范围内的辐射强度理论值 I_b ,最后计算出标定参数 C 。

4.1 辐射强度的测量

用红外线辐射计测量目标的红外辐射强度,实际上是先测量出目标在特定波段红外辐射光照射到红外传感器上产生的电压,然后通过标定参数修正,从而得到红外辐射强度值:

$$I = CV \quad (1)$$

式中: I 为 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 的测量辐射强度; C 为标定参数; V 为目标信号电压的测量值(除去背景)。

4.2 标定参数的计算

红外辐射计标定的核心目的是得到标定参数 C ,利用已知温度的黑体为目标,测量出待标定的红外辐射计在特定距离 L_b 处的信号幅度 V_b ,利用下式即可计算出标定参数 C :

$$C = (I_b/V_b) * (L * L) / (L_b * L_b) \quad (2)$$

式中: I_b 为用于标定标准黑体 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 的理论辐射强度; V_b 为采集到的标准黑体信号电压值(除去背景); L_b 为标定时的距离(辐射计与标准

黑体之间的距离); L 为实际使用时目标测量距离(辐射计与待测量目标之间的距离)。

4.3 标准黑体的理论辐射强度

在计算标定参数 C 的过程中,应首先根据斯忒藩-波尔兹曼定律计算出已知温度黑体的理论辐射强度 I_b ,数学表达式为

$$I_b = (F_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \epsilon \cdot \sigma) \cdot T_b^4 \cdot D_b^2 / 4 \quad (3)$$

式中: $F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为黑体在指定波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐射强度与全波段辐射强度的比例系数; ϵ 为黑体辐射率; σ 为玻尔兹曼常数(5.669×10^{-12}); T_b 为黑体绝对温度(K); D_b 为黑体直径(cm)。

上述参数中, ϵ 、 σ 、 T_b 、 D_b 容易确定,而 $F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 是与黑体绝对温度和 λ_1 、 λ_2 有关的参数,其意义是黑体在工作温度下,在指定波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐射强度与全波段辐射强度之比,也就是黑体在工作温度下普朗克辐射曲线 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的积分值与整个曲线的积分值之比。其计算公式如下:

$$F_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{M(\lambda_1 \sim \lambda_2, T)}{M(0 \sim \infty, T)}$$

$$F(\lambda_1, T) = F(6\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) + ((F(6\ 500\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) - F(6\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K})) \frac{6\ 184 - 6\ 000}{6\ 500 - 6\ 000}) = 0.751\ 95$$

$$F(\lambda_2, T) = F(9\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) + ((F(9\ 500\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) - F(9\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K})) \frac{9\ 276 - 9\ 000}{9\ 500 - 9\ 000}) = 0.897\ 19$$

$$F(\lambda_2, T) - F(\lambda_1, T) = 0.145\ 24$$

5 测试结果

对研制的双通道数字红外辐射计分别在室温(25°C)和低温(-15°C)条件下进行了6次对比试验,主要考核其在严酷自然环境条件下工作的可靠性、双通道测试的一致性及测试的准确性。具体对比方法是将原1905A测试系统和新研制的双通道红外辐射计紧靠放置,两测试系统中心距离不大于100 mm,然后对经合格检验产品进行测试。结果表明:两系统测试的误差小于5%,双通道数字红外线辐射计两通道之间误差小于5%,原1905A测试系统出现2次漏测,双通道数字红外辐射计无漏测。

6 结束语

本文对双通道红外辐射计的工作原理、设计要点、误差分析、设备标定及测试系统试验准确性验证等进行了论述,从上面的论述可以看出,双通道数字红外辐射计的设计思路和特点可克服原单通

$$\frac{M(0 \sim \lambda_2, T) - M(0 \sim \lambda_1, T)}{M(0 \sim \infty, T)}$$

式中: $F(\lambda_1, T)$ 为黑体在波长 $0 \sim \lambda_1$ 之间辐射强度与全波辐射强度之比; $F(\lambda_2, T)$ 为黑体在波长 $0 \sim \lambda_2$ 之间辐射强度与全波辐射强度之比。

精确计算 $F(\lambda_1, T)$ 和 $F(\lambda_2, T)$ 时需要利用计算机对普朗克辐射曲线进行数值积分计算而得到。工程计算通常利用 $F(\lambda, T)$ 与 λT 的对应表,通过查表和差值计算得到 $F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 。举例如下:

对于黑体温度 $T = 773\ \text{K}$ (500°C), $\lambda_1 = 8\ \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 12\ \mu\text{m}$ 。求 $F_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 。

先求出 $\lambda_1 \cdot T = 8\ \mu\text{m} \cdot 773\ \text{K} = 6\ 184\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$, $\lambda_2 \cdot T = 12\ \mu\text{m} \cdot 773\ \text{K} = 9\ 276\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

查表得:

$$F(6\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) = 0.737\ 78$$

$$F(6\ 500\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) = 0.776\ 31.$$

$$F(9\ 000\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) = 0.889\ 99,$$

$$F(9\ 500\ \mu\text{m} \cdot \text{K}) = 0.903\ 04.$$

采用插值得到:

道红外辐射强度测试系统在试验测试中存在的不足,大大提高了测试过程的可靠性和准确性,保证试验测试数据的真实性与可信度,并可消除漏测和数据丢失问题。

参考文献:

- [1] A. R. 杰哈. 红外应用技术[M]. 张孝霖,陈世达,舒郁文,等译. 北京:化学工业出版社,2004.
A. R. Jieha. IR application technology [M]. Translated by ZHANG Xiao-shen, CHEN Shi-da, SHU Yu-wen, et al. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 陈永甫. 红外辐射器件与典型应用[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
CHEN Yong-pu. IR radiation device and typical application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [3] 王汝琳, 王咏涛. 红外检测技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
WANG Ru-lin, WANG Yong-tao. IR detection technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)