

具有同步数据采集系统的多点 多波长高温计的研制

戴景民 卢小冬 褚载祥 康松高 范传新*

TH81

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

摘要:研制成一种新型的用于固体火箭发动机羽焰温度分布测量的棱镜分光式多点多波长高温计, 高温计能够同时测量目标平面上均匀分布的6个点8个波段的热辐射, 目标平面点的空间位置由光阑透镜上的通光孔精确确定, 该仪器具有高速的响应能力, 配以特别设计的同步数据采集系统, 可以保证在测量对象剧烈变化时, 不同波段热辐射对应同一时刻真温。

关键词: 多点多波长, 高温计, 同步数据采集。

DEVELOPMENT OF MULTI-POINT MULTI-WAVELENGTH PYROMETER WITH A SYNCHRONOUS DAS

DAI Jing-Min LU Xiao-Dong CHU Zai-Xiang
KANG Song-Gao FAN Chuan-Xin*

(Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A new type of multi-point multi-wavelength pyrometer for solid propellant rocket engine flame distribution measurement was developed successfully. The instrument can record the radiation fluxes of 8 wavelengths for uniformly distributed 6 points on the target surface, which are well defined by the holes on the field stop lens. The fast-response pyrometer with the specially designed synchronous data acquisition system can assure that the recorded thermal radiation fluxes of different spectrum region are of the same time and the same true temperature even with dramatically changed targets.

Key words multi-point multi-wavelength, pyrometer, synchronous DAS.

引言

多波长技术^[1~3]是辐射测温领域的重要研究内容, 它不需要辅助手段就可能获得目标的发射率和真温, 具有其他发射率补偿技术无可比拟的优点。将多波长技术用于固体火箭发动机羽焰这类对象的温度测量时, 除了真温外, 还需要了解沿发动机轴向和径向的温度。而现有的辐射测温仪表都只能对目标进行单点测量; 如果借助于一定的扫描装置或同时使用多台仪器, 虽然可以达到多点测量的目标, 但是对于象火焰这样的特殊目标, 用上述方法无法确定其测点之间的空间关系, 且固体火箭羽焰温度变化剧烈, 很难实现目标温度分布和多波长算法所必需的高精度、高时间分辨率的同步测量。

为解决固体火箭发动机羽焰温度分布测量上的困难, 我们研制一种能同时测量一定空间分布的6个点, 每个点具有8个工作波段的多点多波长高温计, 这是哈工大与罗马大学合作研制的多波长高温计^[4]的最新技术, 和其原型一样, 仪器使用组合棱镜展开目标热辐射0.5~1.0 μm 间的光谱, 同时仪器首次尝试在主光路中使用离轴设计, 实现同一台仪器的空间分布的6点测量, 并应用同步数据采集技术以满足多光谱测温技术对所有波段热辐射通量对应同一时刻真温的要求。

1 光学设计

多点多波长高温计的基本光学设计如图1。为了应用上述光学系统测量目标平面均匀分布6点的一定

* 航天工业总公司44所, 陕西省, 西安173信箱, 710000
稿件收到日期 1999-01-18, 修改稿收到日期 1999-05-12

* The 44th Institute of China Aerospace Corporation, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Received 1999-01-18, revised 1999-05-12

表 1 计算的探测器光谱位置(单位:毫米)
Table 1 The calculated sensor spectrum positions (unit: mm)

第一组探测器光谱坐标			第二组探测器光谱坐标			第三组探测器光谱坐标		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
53.2	-55.624	±23.306	-3.5	17.119	±26.267	14.2	17.594	±25.112
51.5	-51.726	±23.384	-1.2	12.638	±26.162	15.2	21.280	±25.099
49.7	-48.317	±23.450	-0.2	8.762	±26.116	16.0	24.484	±25.066
48.0	-45.365	±23.523	0.0	6.272	±26.108	16.8	27.269	±25.042
46.6	-42.716	±23.583	0.2	3.241	±26.100	17.4	29.751	±25.038
44.3	-38.662	±23.681	0.0	-0.862	±26.113	18.4	33.533	±24.967
42.0	-34.725	±23.784	0.2	-3.133	±26.125	19.4	37.178	±24.926
40.0	-31.822	±23.875	0.5	-7.900	±26.142	20.0	39.876	±24.902
38.6	-29.408	±23.946	0.7	-11.082	±26.155	20.5	42.087	±24.882
35.5	-25.702	±24.076	1.3	-14.640	±26.189	20.8	45.553	±24.875
31.0	-21.460	±24.270	2.0	-18.800	±26.229	20.5	49.560	±24.858

空间立体角的热辐射,需要使用离轴光路系统,而不是原来使用的近轴光路设计.光阑透镜(FSL)位于准直透镜(L2)的焦平面上,光阑透镜上的6个小孔分别对应着空间均匀分布的6个目标点,设计保证在6m的标准测量距离下,6个4mm×4mm目标点的热辐射光谱精确成像在探测器的有效感光面上.计算的探测器感光面的空间位置关系见表1.标准距离下目标点的空间位置关系见图2.

从图1和表1可以看出,目标点光谱像的位置,即探测器有效感光面最佳位置不是很好的平面,而具有一定的弯曲.我们使用S13336-18BK型硅光电二极管(日本,HAMAMASHU)而不是光电二极管阵列.这样虽然在相同尺寸展开光谱宽度上可安放探测器的数目(即波长数)减少了,但却可以调节单个探测器的位

置以获得最佳像质.

瞄准系统的分划板位于光阑透镜共轭位置,如图1中A-A方向,分划板刻线的交点和光阑透镜小孔的空间位置尺寸相同,光阑透镜小孔开口尺寸为标准目标(4×4mm)尺寸的1/10.反射镜(M1)在测量和瞄准时有不同的位置;转动反射镜(M1)至45°位置,调节物镜,当目标点的像与瞄准系统分划板刻线交点重合时,目标点的一定空间立体角内的热辐射将通过光阑小孔达到探测器的感光面;精确瞄准后,将反射镜(M1)转动至水平位置即可进行测量.

2 电子电路

2.1 前置放大电路

为了实现高速测量,探测器用光导模式工作,图3

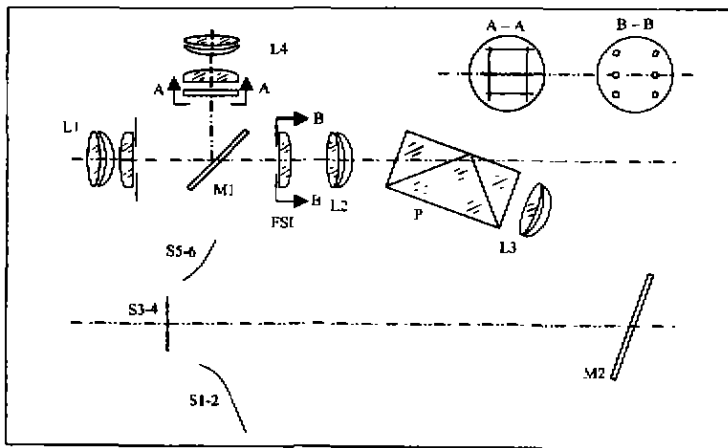


图1 光学系统原理图

L1: 主物镜, M1: 反射镜, FSL: 光阑透镜, P: 棱镜, L3: 暗箱透镜, M2: 反射镜, L4: 目镜, S1-2, S3-4, S5-6: 探测器

Fig. 1 Schematic diagram of the optical system

L1: main object lens, M1: mirror, FSL: field stop lens, P: prism, L3: dark box lens, M2: mirror, L4: eyepiece, S1-2, S3-4, S5-6: sensors

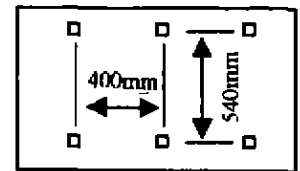


图2 6米测量距离下目标点(4mm×4mm)的空间位置关系

Fig. 2 Space relationship of target points (4mm×4mm) measured at a distance of 6m

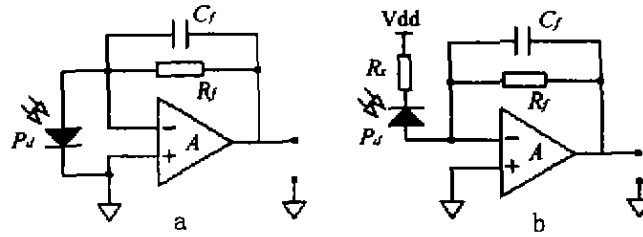


图3 零及非零偏置的光电二极管前置放大电路
 A: 放大器, R_f : 反馈电阻, C_f : 反馈电容, P_d : 光电二极管, R_c : 限流电阻
 Fig. 3 Photodiode preamplifier circuit with zero or non-zero offset
 A: amplifier, R_f : feedback resistance, C_f : feedback capacitance,
 P_d : photodiode, R_c : current-limited resistance

给出这种模式下的 2 种放大电路. 施加一定的偏置电压能提高前置级的响应速度, 但同时也引入噪声(图 3 (b)). 前置放大电路的时间常数由反馈电阻的阻值 (R_f) 和反馈电容的电容值 (C_f) 定义为

$$\tau = R_f \cdot C_f \tag{1}$$

通常, 反馈电容的电容值 (C_f) 取 10pF. 仪器使用的最大反馈电阻值为 22MΩ, 所以前置级最慢的响应时间为 0.22ms.

2.2 同步数据采集系统

同步数据采集系统用于保证全部测量的 48 路热辐射信号是同一时刻温度下的, 在一些温度剧烈变化的场合, 这对于应用各种多波长算法和测量温度分布与时间的变化关系时很重要. 采集系统由采样保持器 (S/H)、多路转换开关 (MUX)、模数转换器 (ADC) 和控制器组成. 控制器发送采样/保持脉冲同时得到 48 路信号并保持在采样电容上, 然后依次选通相应的信号并启动模数转换器进行转换, 控制器还通过 ISA 总线接收、执行指令并发送转换中断等信号给上一级计算机系统. 虽然目前 100MHz 甚至更高速度的模数转换器已有产品, 我们仍倾向于采用上述结构, 这利于降低成本, 也易于与 ISA 总线的个人计算机构成系统. 同步数据采集系统的原理见图 4; 模数转换器为 12 位

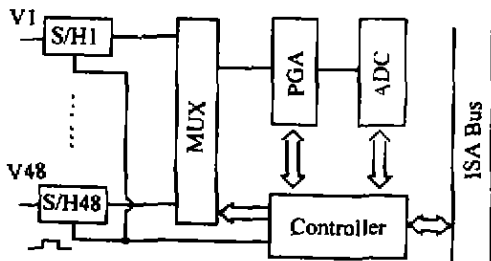


图4 同步数据采集系统原理
 Fig. 4 Schematic of the synchronous data acquisition system

100MHz 逐次逼近型; 程控增益放大器 (PGA) 有单位增益、10 倍和 100 倍 3 档, 用于实现整个量程区间的测量和低发射率时弱小信号的放大.

采样保持器的采样保持控制信号通常与 TTL 电平兼容, 即一个 TTL 门可以同时驱动 8 个采样保持器, 要驱动 48 路采样保持器至少需要 6 个 TTL 门. 实际应用了 8 个 74LS04 反向器, 每个门驱动 6 个采样保持器, 正好占用 ISA 8 位数据总线的 1 个地址. 考虑 74LS04 系列门的速度和一致性, 采样脉冲上升沿的精度优于 1μs. 当需要更高指标的采样保护脉冲时, 可以使用 GAL 或者 PAL 的 5ns 的产品, 但是采样保持脉冲的指标应和前置级的响应时间、采样保持器速度相适应.

3 仪器标定

3.1 波长函数 (PWF) 的标定

对于窄带辐射温度计、探测器的输出信号可以写成

$$S(T) = G \cdot \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda) \sigma(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda \tag{2}$$

式中 $P(\lambda, T)$ 为波长 λ 、温度 $T(K)$ 下的普朗克 (Planck) 分布, $\tau(\lambda)$ 是目标和探测器间的所有光学器件的透过率, $\sigma(\lambda)$ 是探测器的谱响应率, $\Delta\lambda$ 是探测器测量光谱的相应带宽, G 是一个包含目标面积及由仪器入瞳定义的空间立体角因素的几何因子. 乘积 $\varphi(\lambda) = \sigma(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$ 被称为仪器的波长函数 (PWF)^[3]. 通过波长函数的 $\lambda-\varphi(\lambda)$ 表格和仪器定点 T_s 下输出, 可求解 ITS-90 定义的温度 T 的方程 (3) 获得光谱温度为

$$R = \frac{\int_{\Delta\lambda} \sigma(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} \sigma(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot P(\lambda, T_s) d\lambda} \tag{3}$$

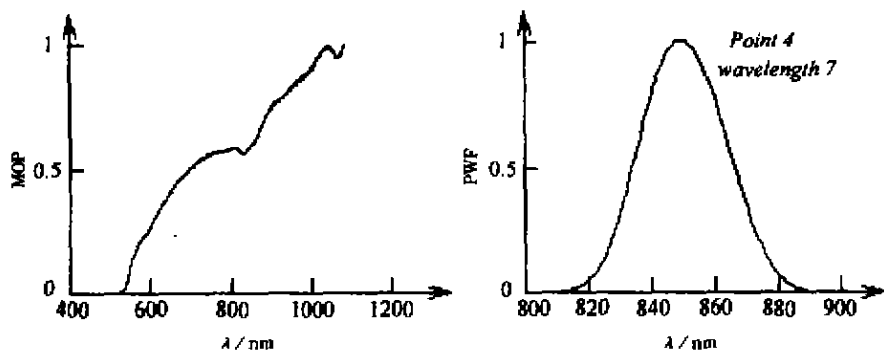


图5 单色仪的输出功率和典型的 PWF 波形曲线
Fig.5 Monochromator output power and typical PWF curve

式中 T_i 为 ITS-90 定义的 Cu、Ag 或 Au 凝固点中的任一个。

仪器的波长函数的标定采用文献[5]中的实验装置自动进行。唯一的差别是测量单色仪输出功率(MOP)时使用硅光电二极管替代原实验装置中的热释电器件,这样做的原因是热释电探测器有长期的漂移,它在实验前甚至需要整个夜晚来稳定电子线路。实验只能得到硅光电二极管响应谱段的单色仪的输出功率曲线,满足我们的应用要求。为消除 MOP 测量中硅光电二极管非平坦谱响应特性的影响,应用高精度的数字化仪得到 HAMAMASHU 探测器用户手册的谱响应特性曲线上的控制点,用三次样条函数在控制点间内插得到计算用的硅光电二极管的谱响应特性曲线。单色仪输出功率曲线和典型的 PWF 曲线如图 5。

3.2 高温黑体炉标定

使用参考有效波长 λ 的概念和 Wien 近似,式(3)可改写为

$$R = \epsilon \cdot \exp(C_2/\lambda \cdot T_1 - C_2/\lambda \cdot T), \quad (4)$$

式中 ϵ 为目标波长 λ 、温度 T 下的光谱发射率, C_2 为第二普朗克常数。其微分形式为

$$dT/T = \lambda \cdot T/C_2 \cdot (dR/R - d\epsilon/\epsilon) +$$

$$(T/T_1 - 1) \cdot d\lambda/\lambda. \quad (5)$$

式(5)显示,要减小有效波长对温度测量的影响,参考点最好选择在仪器工作的温度区间内。仪器的定点标定在高温管式黑体炉上进行,温度为 2000 C 时各通道的输出信号见表 2。

根据仪器量程内一系列定点标定结果,可求解类似式(6)的方程获得目标的光谱温度:

$$\ln R = a + b/T + c/T^2. \quad (6)$$

式中 a 、 b 和 c 是标定常数,可以根据需要的标定精度增加标定方程的阶次,但要注意标定常数的个数不要超过仪器量程内标定数目减 2。由于本文仪器使用的量程范围很难实现全程高精度的内插标定,因而使用一个定点的标定结果和仪器的 PWF 数据得到的电压-温度表,通过查表获得目标的光谱温度,该方法也称为一点标定法^[6]。

3.3 同步数据采集系统的标定

数据采集系统标定的内容包括数字化有效位(ENOB)和 48 通道间的时间延迟。通常将 ADC 的位数字化系统的有效位,即系统的随机误差分布在 $[-\Delta/2, \Delta/2]$, Δ 是 ADC 的最小分辨电平。实际上当 ADC 高速运行及 ADC 周边电路的影响,系统的有效

表 2 定点标定仪器输出(单位: mV)
Table 2 Fixed-point calibration output (unit: mV)

波长	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6
λ_1	75.63	51.98	90.54	81.68	39.44	64.60
λ_2	108.56	88.31	103.51	155.26	139.74	86.58
λ_3	160.84	140.29	161.15	254.14	117.53	183.74
λ_4	273.65	207.26	345.82	390.87	363.66	200.57
λ_5	481.33	465.44	359.12	671.64	345.01	496.74
λ_6	433.47	335.69	557.78	586.26	493.94	415.16
λ_7	286.86	340.86	336.41	365.10	320.73	454.76
λ_8	319.96	233.96	498.57	437.54	406.67	995.74

位数要小于 ADC 的位数, 实现仪器各通道信号之间的同步采样, 才能保证多波长理论对于同一时刻温度不同波长输出的要求. 数字化有效位和各测量通道时间延迟通常需要用高于待标定系统精度的谐波和脉冲信号源, 是模数转换领域的通用技术.

4 结论及仪器应用展望

一种新型用于固体火箭发动机羽焰的温度分布测量的多点、多波长高温计研制成, 它继承了原 35 波长高温计稳定和大信噪比的优点, 采用离轴光学系统设计, 将单点测量扩大到一定空间分布的 6 个目标点的测量, 配以特别设计的同步数据采集系统, 能实现高时间分辨率的同步测量以满足目标变化剧烈的情况下多光谱测温理论的要求. 这种高温计可用于: (1) 一般多波长高温计使用场合; (2) 测量不多于空间 6 个点的温度分布; (3) 通过在温度分布均匀表面的一个或多个目标点钻孔模拟人工黑体, 真正实现材料真温和光谱发射率的同步测量; (4) 在测量对象变化剧烈场

合, 实现多光谱真温测量.

REFERENCES

- [1] Cardener J L, Jones T P. Multi-wavelength radiation pyrometry where reflectance is measured to estimate emissivity, *J. Phys. E.*, 1980, **13**:306—310
- [2] Coates P B. Multi-wavelength pyrometry, *Metrologia*, 1981, **17**:103—109
- [3] Chen Y. A method for measuring emissivities and true temperatures from multiple spectral reflection in pyrometry, *High Temp. -High Pressures*, 1992, **24**:75- 85
- [4] Ruffino G, CHU Zai-Xiang, KANG Song-Gao, et al. Multi-wavelength pyrometer with photodiode array, *Temp. , its Measur. and Contr. in Sci. and Ind.*, 1993, **6** (2): 807 - 810
- [5] Coppa P, Ruffino G, Spena A. Pyrometer wavelength function: its definition and error analysis, *High Temp. - High Pressures*, 1988, **22**:497—490
- [6] DA1 Jiao-Min. The study of the technique of Multi-spectral radiation thermometry. Doctoral thesis, Harbin Institute of Technology (戴景民. 多光谱辐射测温技术研究, 哈尔滨工业大学博士论文). 1995:49