

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.02.06

多光谱表面温度计信号调理电路设计及环境适应性研究

金振涛, 杨永军, 张学聪, 李丹, 温悦
(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 多光谱测温是发动机和重型燃机热端表面温度测量的一种重要方法, 但是由于背景环境温差大、湿度不确定和电磁干扰等不利因素, 给多光谱表面温度计微弱信号处理带来非常大的困难。本文主要研究适用于复杂环境下的多光谱表面温度计微弱信号调理电路设计, 研究选型适用于多光谱表面温度计的近红外探测器方法; 创新性地采用了输入保护环、开尔文开关等技术, 提升了信号放大的准确性; 介绍了电路板选材选用方法, 电路三防工艺和防电磁干扰的具体实施方式。通过实验表明, 多光谱表面温度计满足测量需求, 具有一定的环境适应能力。

关键词: 多光谱测温; 微弱信号调理电路; 开尔文开关; 输入保护环; 环境适应性

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)02-0031-07

Multi-wavelength Pyrometer Circuit Design and Signal Processing for the Measurement of True Surface Temperatures of Turbine Blade and Heavy Duty Gas Turbines

JIN Zhentao, YANG Yongjun, ZHANG Xuecong, LI Dan, WEN Yue

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The main problem in the application of radiation pyrometer to the measurement of true surface temperatures of turbine blade and heavy duty gas turbines is the large error arising from the unknown emissivity of the surface, high speed and electromagnetic interference. This article focuses on the design of weak signal conditioning circuits for multispectral surface thermometers in complex environments and the study of the near infrared detector that is suitable for multispectral surface thermometer. The accuracy of signal is improving because of the technologies of guard ring and the Kelvin switch. Some special treatment, such as Teflon material and special circuit surface treatment, has improved anti-interference ability and environmental adaptability of signal processing. The results show that temperature measurement error of this multi-wavelength pyrometer is fulfil the requirements and has a certain environmental adaptability.

Key words: multi-spectral; amplifier circuits; Kelvin switching; guard ring; environmental adaptability

0 引言

多光谱辐射测温是利用多个光谱得到测量信息, 经过数据处理得到目标的真实温度^[1]。多光谱表面温度计在发动机和重型燃机热端表面温度测量中, 能够克服目标发射率不确定、背景环境复杂等不利因素, 可以在不接触目标物体的情况下较为准确地测量出其表面温度^[2], 这对于工作中的发动机温度测量非常重要。

随着第五代战机的发展, 对航空发动机的温度测量提出了越来越高的要求^[3]。早在 1964 年英国的 RR 公司就开始了燃气涡轮叶片的温度测量, 提出了一套基于光学的多光谱测温方法, 随后研究了发射率修正、信号处理、数据处理等问题, 形成了产品, 测温范围

为 550 ~ 1400 °C, 误差为 ± 6 °C^[2]; 英国的 Land 公司生产的 FP11 型多光谱测温仪测温范围达到了 600 ~ 1300 °C, 测温误差为 ± 2 °C^[4]。国内许多的研究机构也开展了多光谱辐射测温的研究, 哈尔滨工业大学的冯池、高山等人研究了多光谱辐射测温仪在高温恶劣环境下的应用, 并对涡轮叶片温度进行了测量, 温度测量范围为 800 ~ 1400 °C, 误差小于 7 °C^[5]。然而, 由于背景环境温差大、湿度不确定和电磁干扰等不利因素影响^[6], 给多光谱测温系统中的微弱信号处理带来很多困难, 这也是制约多光谱辐射测温仪发展、影响其测温范围和测温准确性的重要因素。

航空工业计量所在国家重大仪器专项“高温温度、压力、振动传感器开发与应用”的项目中, 承担了多光

谱表面温度计、蓝宝石光纤压力传感器设计等任务，主要应用方向为航空发动机叶片和重型燃气机表面温度测量。其中在多光谱辐射测温表面温度计设计和研制过程中，对信号调理电路进行了多项改进设计，研究了在不同环境状态下微弱信号处理电路的设计及电路板处理方法。结果表明，在 800 ~ 2050℃ 的温度范围内，所设计的多光谱表面温度计传感器系统测量误差小于 1%，具有一定的环境适应能力，满足设计要求。

1 多光谱高温表面温度计测量原理

多光谱测温方法可以利用多个波长下的测量数据，通过合适的数学模型和数据处理方法，将被测目标的真实温度解算出来，得到比常规辐射测温仪器更为准确的结果^[7]。假设多光谱温度计有 n 个通道，第 i 个通道感受的高温目标的辐射出射度为 $E(\lambda_i, T)$ ，根据普朗克公式得到各通道探测器的输出信号为

$$V_i = A_i \cdot E(\lambda_i, T) = A_i \cdot \varepsilon(\lambda_i) \cdot \frac{c_1}{\lambda_i^5 (e^{(c_2/\lambda_i T)} - 1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： A_i 为与仪器有关的常数，一般通过标定获得； $\varepsilon(\lambda_i)$ 为被测目标在 i 通道波长 λ_i 下的发射率； T 为温度值； c_1, c_2 分别为第一，第二辐射常数， $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ， $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。通过增加发射率约束条件，即 $\varepsilon(\lambda_i, T) \sim f(a_1, a_2, \dots, a_m, \lambda_i)$ ，利用式(1)即可解出目标温度 T 。其中， a_1, a_2, \dots, a_m 是关于波长 λ_i 方程的参数， $m < n$ 。

多光谱高温表面传感器结构原理如图 1 所示，光学探头接收被测目标的热辐射，经光纤传输至分光系统分成若干通道，各自经光电转换、信号调理后由式(1)组成的方程解算出温度。

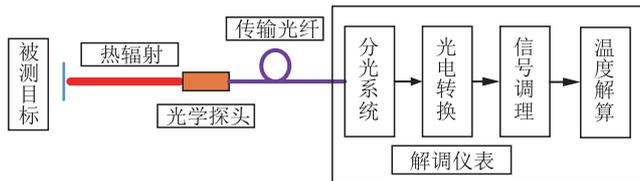


图 1 多光谱高温表面传感器结构原理框图

2 信号放大调理电路设计

2.1 光电探测器选型及参数影响

多光谱表面温度传感器采用近红外 4 波段的测温系统，目前，适用于 1 ~ 2 μm 近红外波段的光电探测器有锗(Ge)型和铟镓砷(InGaAs)型探测器。锗探测器

的光谱响应度与铟镓砷探测器相近，光敏面和响应率也近似。探测器的参数主要有分流电阻、分流电容和噪声功率^[8]，考虑到探测器的参数会直接影响到前置放大器输入噪声大小，故为此比较了锗探测器和铟镓砷探测器产品的内部参数，如表 1 所示。

表 1 常用光电探测器的典型性能参数

参数名称	分流电阻	分流电容/F	噪声等效功率 / (W · Hz ^{-1/2})
锗(Ge)	≤200 kΩ	13 × 10 ⁻⁹	7 × 10 ⁻¹³
铟镓砷(InGaAs)	≤5 MΩ	1 × 10 ⁻⁹	4.3 × 10 ⁻¹³

探测器分流电阻会随着环境温度的变化发生变化，如果环境温度上升 10℃，那么分流电阻会减小一半甚至更多，放大器的失调电压会作用于该分流电阻上，产生一个误差电流，增加噪声增益，导致的输入误差可表示为

$$E_i = \frac{V_{os}}{R_s} \quad (2)$$

式中： V_{os} 为放大电路放大器的失调电压； R_s 为探测器的分流电阻。

由式(2)可知，如果探测器分流电阻太小，环境温度不稳定，那么探测器输出就不稳定，将使放大器引入很大的输入误差；分流电容主要对放大器的稳定性和带宽产生影响，根据探测器容值大小，设计合理的前置放大电路可以减小该参数的影响；由表 1 可知两种探测器在噪声功率上差异不大。综上，选择铟镓砷探测器可以减小信号放大时输入噪声的影响。

2.2 前置放大调理电路设计和噪声分析

选用的探测器为光伏型，输出为电流信号，一般应用跨阻放大电路对小信号进行放大^[9]。光电探测器可等效为恒流源、分流电容和分流电阻的组合，设计原理如图 2 所示。

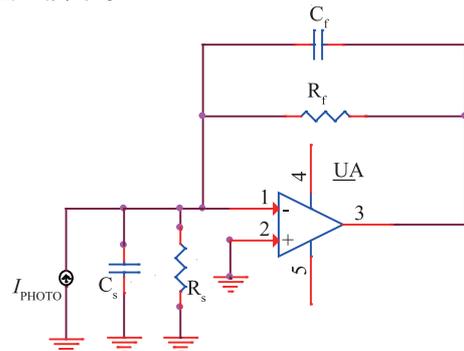


图 2 跨阻放大电路原理

如果只是在运用放大器负端和输出端跨接上电阻,会造成不稳定性错误,而且运放输入端的电容越大,运放越趋于不稳定,因为光电探测器等效电容很大,如果没有反馈电容,电路的输出是不稳定的,容易发生振铃现象。保证光电探测器电路稳定性的关键是增加反馈电容,在反馈系数中增加一个零点。反馈电容的大小由光电探测器、反馈电阻和频率共同决定。该跨阻放大电路的增益和信号带宽频率如式(3)和式(4)所示。

$$V_o = \frac{I_p \times R_f}{1 + sC_f R_f} \quad (3)$$

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi C_f R_f} \quad (4)$$

式中: V_o 为输出电压; I_p 为探测器输出电流; R_f 为反馈电阻; C_f 为反馈电容; f_{max} 为电路可响应的最大信号频率。

前置放大电路的主要输出噪声来源于反馈电阻和放大器的输入电压产生的噪声,分别由式(5)和式(6)表示。

$$E_r = \sqrt{4kT \times R_f \times f_x \times \frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

$$E_v = V_i \frac{(C_s + C_f + C_i)}{C_f} \sqrt{f_x \times \frac{\pi}{2}} \quad (6)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; f_x 为信号的频率; C_s 为分流电容; V_i 为放大器的输入噪声; C_i 为放大器的输入电容。

根据式(5)和式(6),放大器的输入电压噪声和其自参数有关,当选择好放大器后,前置放大电路的主要噪声来源为反馈电阻,故选择温漂系数小、准确性高的反馈电阻。反馈电容根据探测器分流电容、放大器的输入电容和信号的频率选择容值,同时要求稳定性性能好,这样有利于降低前置放大电路的噪声影响。

2.3 电路设计及元器件选型

根据普朗克定律,结合光学系统参数计算,探测器接收到光能量转换为输出的电流信号大小约为 10 nA 至 10 μ A。在这么宽的量程范围内,靠一个放大倍数是无法覆盖整个量程的。所以放大电路将整个电流信号输出放大范围分为四个量程,放大倍数分别为 10^7 , 10^6 , 10^5 , 10^4 , 将微弱的电流信号放大至采集电路能够识别的区间。

各量程之间需要自动切换,一般情况下是使用 DSP 控制多路模拟开关或继电器切换不同的反馈电阻,但是这些方法会引起多种误差,造成电路不稳定甚至错误,例如模拟开关会引起电压和温度相关的增益误差,漏电流会引起失调误差。为了避免上述误差和错误,在本设计中,创造性地应用了开尔文开关技术,方法是在各增益选择环路中引入两个开关,一个用于将跨阻和运放输出连接到反馈网络,另一个用于反馈网络输出连接到下游元件,信号放大调理电路的工作原理如图 3 所示。

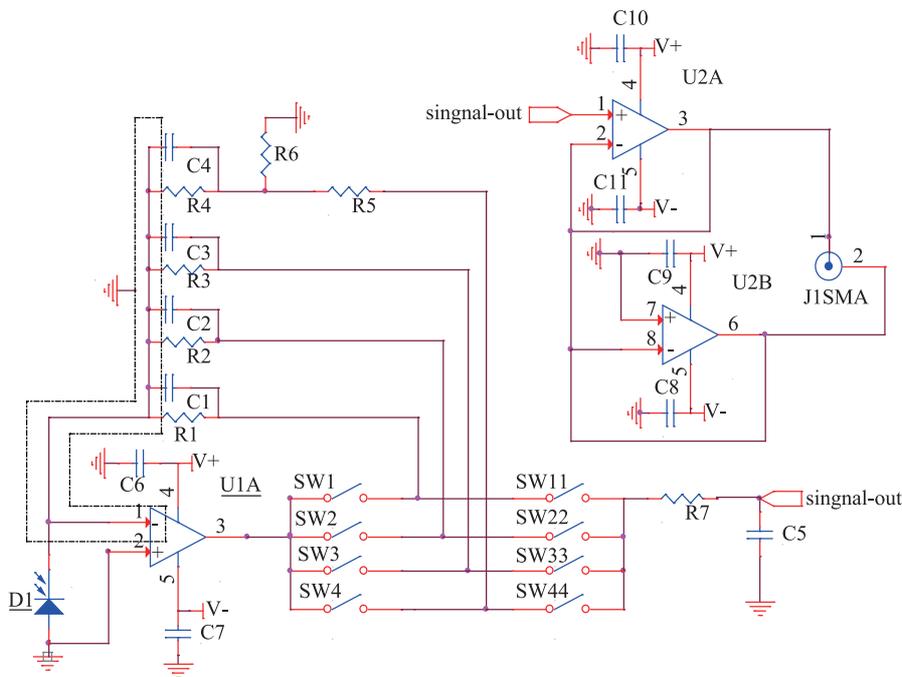


图3 信号放大调理电路原理图

结合原理图,用式(7)~式(9)可推导开尔文开关如何消除通道间导通电阻。

$$V_{\text{out}} = -I_p \times (R_f + R_{\text{sw}}) \quad (7)$$

$$V_1 = V_{\text{out}} \times [R_f / (R_f + R_{\text{sw}})] \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),得

$$V_1 = -I_p \times R_f \quad (9)$$

式中: V_{out} 为第一放大器输出; R_{sw} 为开关电阻; V_1 为节点中心电压。

通过公式推导发现,虽然这种技术方法需要使用的开关数量加倍,但中心节点的电压不再与开关相关,而是取决于通过所选电阻的电流。该方法消除了模拟开关带来的导通电阻的问题,在不同增益选择环路中引入两个开关,一个用于将反馈电阻输出连接到反馈网络,另一个用于将反馈网络输出连接到下游元件。这种技术使用开关的数量加倍,但是中心节点电压不再与开关相关,而是仅取决于通过所选电阻的电流。而开关(SW1和SW2)之间仅有很小的输出阻抗,如果放大器驱动高阻抗负载,则其误差贡献可忽略不计,能达到很好的放大效果。电流信号在被反馈电路放大之后,经过低通滤波减少了高频噪声,再应用电压跟随器对输出信号进行差分转换,使得放大倍数翻倍,提高了ADC采集的驱动能力。

放大10 nA级的信号且放大倍数为 10^7 时,应该使用的反馈电阻为5 M Ω ,但是电阻大噪声也大,为了降低噪声,增加信号带宽,采用T网络电阻反馈网络,利用了500 k Ω ,1 k Ω 和110 Ω 组合T网络方式实现了 10^7 倍数的放大,电阻的温漂系数分别为 25×10^{-6} , 5×10^{-6} , $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,反馈电容为0.5 pF;放大100 nA级的电流信号时,使用反馈电阻也为500 k Ω ,温漂系数为 $25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,反馈电容为1 pF;放大1 μA 级电流信号时,放大倍数为 10^5 ,使用反馈电阻为50 k Ω ,温漂系数为 $25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,反馈电容3.3 pF;放大10 μA 级电流信号时,放大倍数为 10^4 ,使用反馈电阻5 k Ω ,反馈电容10 pF。为了保证放大的准确性,选择电阻的误差优于0.1%。这样选择的反馈电阻覆盖了探测器输出的全部信号范围,精度和温漂带来的噪声影响几乎可以忽略不计。同时根据式(4)可知,在每个量程内满足放大的信号频率在15 kHz以上的要求。

2.4 输入保护环设计

输入微弱电流信号,很容易受到来自电路板上的漏电流和电磁干扰。为了防止输入信号受到干扰,在电路板上设计了保护环,减少电路板电磁和漏电流影响。其设计原理是在输入端子和输入走线外围,用保

护环将其保护起来,达到防止漏电流干扰的目的。PCB设计的制板中,其设计思路的示意图如图4所示。

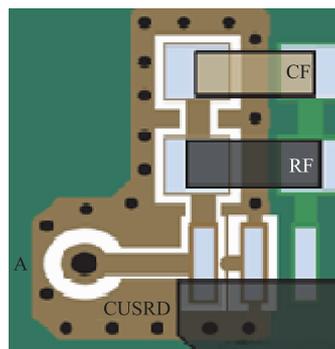


图4 输入保护示意图

图4中,A点是探测器电流输入端,在整个电流输入的回路中,用0.127 mm宽的裸露的铜皮将输入端及走线包围起来,裸露的铜线和地相连,这种工艺设计能将电路板上的漏电流隔离,避免了信号干扰。

2.5 环境适应性电路加工工艺设计

在频率不是很高的情况下,采用普通的FR4的电路板材即可,但是微弱电路信号,例如nA级的信号,如果电路板材不经过挑选直接使用,那么将在电路板上产生漏电流,这对于输入信号的干扰将是致命的。FR4的板材的阻抗一般在 $10^{11} \sim 10^{15} \Omega$ 左右,如果是 $\pm 5 \text{ V}$ 甚至幅值更高的电源,将在电路板上产生高达0.1 nA的干扰电流,如果在高温高湿的环境下,这种干扰电流将进一步扩大,这对于探测器的信号测量显然是不利的,为了保证电路板产生的干扰信号不影响到输入信号,必须采用阻抗更大的板材,采用阻抗为 $10^{15} \sim 10^{18} \Omega$ 的特氟龙板材为更好的选择,噪声电流信号远远低于输入的信号,几乎不会产生影响。为了提高电路导电率,电路板焊接采用回流焊或者波峰焊的方法,采用导电率更高的SAC305锡浆进行焊接,避免人工焊接带来的误差。

测量发动机叶片温度时,污染物较多,例如油污等,对微弱信号处理带来了很大的困难,为此有必要对电路板进行三防涂覆。涂覆之前需要在微波清洗机中对焊接好的电路板进行3 h以上的清洗,清除助焊剂等一些微小的颗粒物,保证电路板的洁净度。在电路板表面喷涂上0.5 mm厚的聚对二甲苯三防漆,保证喷涂厚度均匀,但不影响电路连接导通等功能。光学系统和电路系统被封装在铁盒中,光纤光路输入线和电路输入输出线用防水接头连接,盒子和盒身用防水密

封圈进行密封。

3 标定和环境适应性试验

3.1 信号放大调理电路试验验证

使用标准信号源对微弱信号放大电路准确性和稳定性进行考核。使用 KEITHLEY6221 提供标准信号 100 nA, 对其分别放大 10^7 和 10^6 倍; 提供标准信号 0.010, 1, 10, 100 μA , 对该系列信号则分别放大 10^7 , 10^6 , 10^5 和 10^4 倍。使用 Agilent2901A 数表分别对这些标准信号进行了长达近 4 h 的连续监测, 监测数据的最大最小值如表 2 所示。

表 2 不同放大倍数的标准信号测试结果

标准信号	测量结果/V	
	MAX	MIN
100 nA	1.003	0.997
100 nA	0.0994	0.0992
10 nA	0.0999	0.0991
1 μA	0.9998	0.9991
10 μA	0.9997	0.9991
100 μA	0.9998	0.9994

将 10 nA 放大 10^7 倍, 监测近 3 h 放大后的电压值随时间变化如图 5 所示, 从图表中可以看出, 在近 3 h 的测试中, 放大后的信号波动为 0.1‰, 稳定性非常好。放大倍数为 10^7 时, 输入 0 nA 至放大电路, 其输出为 0.2 mV, 对其进行 0 输入补偿, 计算放大倍数的相对误差, 均在 0.3‰内, 说明放大微弱信号具有很高的准确性, 这对于 1% 的测温误差要求可以忽略不计。

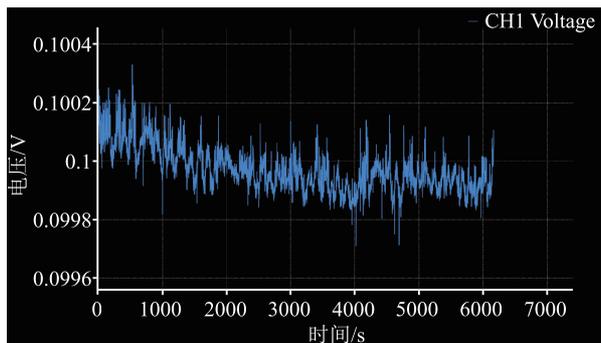


图 5 标准信号放大效果

3.2 静态温度校准试验和环境试验

使用多光谱方法建立测温方程组, 利用矩阵奇异值分解对方程组进行求解。使用黑体辐射源对系统的测温准确度指标进行验证, 试验如图 6(a) 所示。将黑体辐射源调整至 800 ~ 2050℃ 之间的整百度点和上限值, 使用多光谱测温系统对黑体辐射源进行测试, 读取输出的温度值, 与黑体辐射源的证书值进行对比, 得到的结果如表 3 所示。

表 3 静态温度校准结果

温度点/℃	测量值/℃	相对误差/%
800	800.3	0.04
900	899.3	-0.08
1000	1000.6	0.06
1100	1100.7	0.06
1200	1201.2	0.10
1300	1299.4	-0.05
1400	1398.3	-0.12
1500	798.3	-0.21
1600	900.6	0.07
1700	1001.3	0.13
1800	1100.2	0.02
1900	1199.1	-0.08
2000	1301.1	0.08
2050	1400.7	0.05

从表 3 中可看出, 在各个温度点校准得到的数据与标准值相比相对误差的绝对值均不大于 0.3%, 优于设计指标, 说明能够准确地测量温度值。

为了验证多光谱表面温度计的环境适应性, 对多光谱表面温度计进行了高低温贮存试验和湿热贮存试验, 试验如图 6(b) 和 6(c) 所示。

将多光谱表面温度计在低温贮存条件为 -30°C 的环境试验箱中放置 24 h, 在高温贮存条件为 70°C 的环境试验箱中放置 24 h, 湿热贮存环境湿度为 95%, 温度在 $30 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 间循环变化, 每 2 h 为一个周期, 贮存 24 h。每一次环境试验后, 选取了设计极限温度点和量程切换的温度点依次进行测试, 选取的温度点为 800, 1000, 1400, 2050℃, 测试后的数据如表 4 所示。



图6 多光谱辐射表面温度计黑体测试和环境试验

表4 环境适应性测试结果

温度/℃	高温存储		低温存储		湿度循环	
	测量值/℃	相对误差/%	测量值/℃	相对误差/%	测量值/℃	相对误差/%
800	800.3	0.04	798.3	-0.2	809.028	0.83
1000	1000.6	0.06	1000.8	0.08	1002.4	0.08
1400	1100.7	0.06	1402.41	0.17	1393.38	-0.47
2050	1201.2	0.10	2049.45	-0.03	2034.5	-0.93

从表4中可以看出, 高低温贮存对于多光谱表面温度传感器几乎没有影响, 同时也说明信号调理电路对于高低温环境具有较好的适应性。湿热环境对于多光谱表面温度计的影响稍微大一些, 后期检查中, 发现固定盒子的发黑螺钉有生锈的现象, 说明还是有水蒸气进入了盒中, 但是电路依然正常工作, 并且能够满足设计要求, 说明电路三防工艺发挥了作用。

4 结论

本文主要介绍了多光谱表面温度计中多量程微弱信号调理电路设计方法, 通过黑体的校准测试试验表明, 传感器的系统测温范围达到了800~2050℃, 测量误差小于0.3%, 说明了设计的电路能够精准放大微弱的探测器输出信号。为了满足项目环境适应性的要求, 通过电路元器件参数的设计和选型, 增强了信号处理系统对于高低温环境的适应性, 通过电路板的三防处理及光电整体封装处理, 提升了信号处理系统在湿热环境中的适应能力。最后, 对传感器整体进行了环境适应性试验并通过了考核, 这些试验为多光谱表面温度计传感器能够应用于航空发动机的叶片温度测量提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 孙晓刚, 杨春玲, 褚载祥, 等. 多光谱测温法的实验研究-发射率模型的自动判别[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 358-360.
- [2] Kipngetch K D, Feng C, Gao S. Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces [J]. Measurement, 2016, 92: 219-233.
- [3] YAO Yanling, DAI Jun, HUANG Chunfeng. A survey of development of modern aeroengine temperature testing technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 481(12): 103-107.
- [4] 王超, 苟学科, 段英, 等. 航空发动机涡轮叶片温度测量综述[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4): 501-512.
- [5] Gao S, Feng C, Wang L, et al. Multi-spectral temperature measurement method for gas turbine blade [J]. Optical Review, 2016, 23(1): 17-25.
- [6] Wang G, Wang A, Nirmalan N V, et al. Optical sensor system for a gas turbine engine and method of operating the same: US9046411 [P]. 2015-06-02.
- [7] 孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等. 基于多光谱法的固体火箭发动机羽焰温度测量[J]. 清华大学学报, 2003, 43(07): 916-918.

- [8] Sakuma F, Hattori S. “Establishing a Practical Temperature Standard by Using a Narrow-band Radiation Thermometer with a Silicon Detector” in Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry [C]// Schooley J F. AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 1982: 421-427.
- [9] 郭治元. 负反馈放大电路的稳定性分析[J]. 甘肃广播电视大学学报, 2019, 29(3): 74-78.

收稿日期: 2020-02-28

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0100600)

作者简介



金振涛(1987-), 男, 陕西汉中, 硕士, 主要从事标准辐射温度计和接触式温度计产品设计开发工作, 曾参与多项精密温度测量仪电路系统的设计研究。已经申报并授权实用新型专利1项、发明专利1项, 受理发明专利1项。

新装置将光束扩宽了400倍

通过使用光波而不是电流来传输数据, 光子芯片(即光电路)在从计时到电信的许多领域都有了先进的基础研究。但是对于许多应用来说, 穿过这些电路的窄光束必须充分加宽才能与较大的片外系统连接。更宽的光束可以提高医学成像和诊断程序的速度和灵敏度, 加强检测痕量有毒或挥发性化学物质的安全系统, 并促进依赖于大组原子分析的设备。

美国国家标准与技术研究院(NIST)的科学家们现已开发出一种高效的转换器, 可以将光束直径扩宽400倍。相关研究内容已在《光: 科学与应用》(Light: Science and Applications)杂志上发表。

转换器在两个连续的阶段中加宽了光束的横截面或面积。最初, 光沿着光波导传播, 这是一条薄而透明的通道, 其光学特性将光束直径限制在几百纳米, 不到人类头发平均直径的千分之一。因为波导通道非常狭窄, 所以一些传播的光向外延伸超出了波导的边缘。利用这种拓宽的优势, 研究小组将一个与波导材料相同的矩形板放置在距离波导一个微小的、精确测量过的距离上。光可以跳过两个组件之间的微小缝隙, 并逐渐渗入平板。

平板在垂直(从上到下)的维度上保持光的窄度, 但在横向或侧向维度上没有这样的限制。随着波导和平板之间的间隙逐渐变化, 平板中的光形成精确定向的光束, 其宽度是原来光束直径约300 nm(纳米)的400倍。

在扩展的第二阶段, 即增大光的垂直维度, 穿过平板的光束遇到了衍射光栅。这种光学器件具有周期性的规则或线型, 每个都会散射光线。研究团队设计了不同深度和间距的规则, 以使光波结合在一起, 形成一条与芯片表面几乎成直角指向的宽光束。

重要的是, 因为光在两个阶段的扩展过程中保持准直或精确地平行, 所以它保持停留在目标上而不扩散。准直光束的面积现在足以通过很长的距离来探测大的扩散原子组的光学特性。

研究人员已经使用两级转换器成功分析了大约1亿个气态铷原子从一种能级跃升到另一种能级时的性质。这是一个重要的概念验证, 因为基于光与原子气体之间相互作用的装置可以测量诸如时间、长度和磁场等物理量, 并且还可以应用于导航、通信和医学领域。

研究人员指出: “原子移动非常快, 如果监测它们的光束太小, 它们就会以非常快的速度进出光束, 以至很难测量它们”, “利用大型激光束, 原子在光束中停留的时间更长, 可以更精确地测量原子的特性”。这样的测量可以改善波长和时间标准。

(摘自 计量测控)