

文章编号: 1001-3806(2002)02-0090-04

实时测温系统中测温精度的提高措施*

施德恒¹ 郭峰¹ 刘玉芳² 陈玉科¹

(¹空军第一航空学院基础部, 信阳, 464000) (²河南师范大学物理系, 新乡, 453002)

摘要: 在介绍一种利用 InGaAs/ I 半导体激光器实现的实时测温系统的基础上, 着重从硬、软两方面研究了在该系统中所采取的提高其温度测量精度的若干措施: 一是精选探测器、优化设计调制盘并进行选频放大; 二是在调制盘与探测器之间置一窄带滤光片; 三是采用水冷遮蔽板并进行电气补偿; 四是提高系统的采样精度。进行了一些必要的分析和讨论。

关键词: 温度测量; 实时测量; 半导体激光器; 测温精度

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Measures to improve the accuracy of a real-time temperature measurement system

Shi Deheng¹, Guo Feng¹; Liu Yufang², Chen Yuke¹

(¹ Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang, 464000)

(² Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, 453002)

Abstract: A real-time temperature measurement system with InGaAs/ I is introduced at first. Then measures to improve the accuracy are discussed. The first is to select the detector, optimize modulation disk and amplify the signal with selective frequency. The second is to place a narrow band filter between modulation disk and the detector. The third is to use water-cooling shelter and take electrical compensation. The fourth is to improve the sampling accuracy of the system. At last some relative analyses and discussion are put forward.

Key words: temperature measurement; real-time measurement; laser diode; temperature measurement accuracy

引言

笔者曾提出了一种利用半导体激光器 InGaAs/ I 作光源实现的实时测温系统^[1]。在该系统中, 激光器与探测器对称地置于待测物体表面法线的两侧, 如图 1 所示。

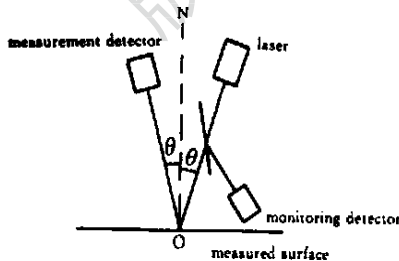


Fig. 1 Positioning method of laser and detectors

当无激光束进入检测探测器时, 检测探测器接

收到的仅是待测物体的辐射能 P_1 :

$$P_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A_1^2 L d \quad (1)$$

式中, D 为光学系统的通光口径; f 为光学系统的焦距; τ_0 为大气的传播系数; A_1 为探测器的灵敏元面积; τ_1 为调制盘的调制系数; τ_2 为温度为 T 的待测物体在波长 λ 处的比辐射率; τ_3 为光学系统对波长为 λ 的光的总透过率; L 为温度为 T 的黑体在波长 λ 处的单色辐射能; λ_1, λ_2 为待测物体进入探测器的光辐射的波长下限和上限。

当有激光束进入检测探测器时, 检测探测器接收到的能量 P_2 由待测面反射的激光能量及待测面辐射的红外能量这两部分组成:

$$P_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A_1^2 L d + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A_1^2 E d \quad (2)$$

式中, τ_4 为待测表面的反射率; τ_5 为待测面镜面反射特性的光学校正系数; E 为入射待测面的单色激光

* 河南省科技攻关计划项目。

作者简介: 施德恒, 男, 1964 年 6 月出生。教授。主要从事光电检测及光化学方面的研究工作。

收稿日期: 2000-12-28; 收到修改稿日期: 2001-07-17

能量, $P_3 = \frac{2}{1} E d$, 由监测探测器监测得到^[1]。

由 Kirchhoff 定律, 有 $\epsilon = 1 - \rho$ (3)

再由黑体辐射公式:

$$L = 2 \pi h c^2 \cdot \epsilon^{-1} [\exp(hc/kT) - 1]^{-1} \quad (4)$$

并利用(1)式,(2)式和(3)式,在一定条件下,即可求出待测物体的温度。式中, h 为 Planck 常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为 Boltzmann 常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

实现上述测量原理的系统的原理结构方框图如图 2 所示。图中, 1 为调制盘; 2 为同步光电转换

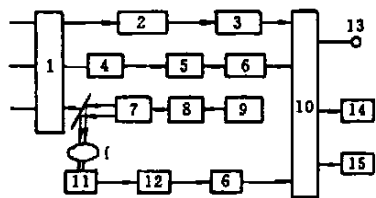


Fig. 2 Schematic diagram of the system

系统; 3 为整形放大电路; 4 为检测光电转换系统; 5 为放大及抗干扰电路; 6 为模-数转换电路; 7 为扩束镜; 8 为准直镜; 9 为激光器; 10 为 8031 单片机系统; 11 为监测光电转换系统; 12 为电压跟随放大电路; 13 为输出; 14 为显示; 15 为打印。其相应的硬件电路实现示意图如图 3 所示。

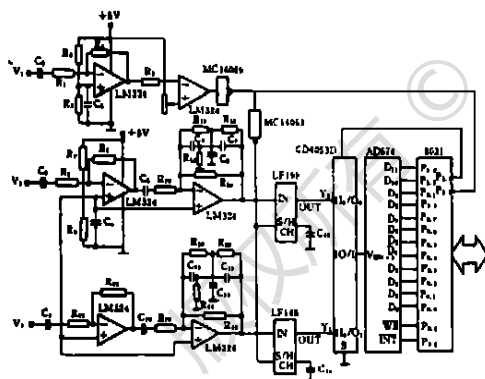


Fig. 3 Schematic diagram of circuit

光电转换系统将光信号 (P_1, P_2, P_3) 转变成电信号。电信号经放大处理后再由 A/D 转换器转换, 最后由单片机系统处理。在这一过程中, 有许多因素都能影响到温度的测量精度。下面对这些因素进行一些分析和讨论, 并提出相应的解决方法。

1 提高温度测量精度的若干措施

1.1 精选探测器、优化设计调制盘并进行选频放大

1.1.1 精选探测器 精选该实时测温系统的探测器是实用化该系统的重要保证, 也是提高该系统测温精度的技术关键。根据该系统的设计指标并结合

其工作环境, 我们选择钽酸锂热释电探测器作光接收器件, 进行了一系列的计算和分析^[2]。所以认为, 钽酸锂热释电探测器完全满足该系统的要求。选择钽酸锂热释电探测器作光接收器件的理由还有: (1) 钽酸锂元件的居里温度、探测率及响应率都较高, 可以测量较低的温度, 这是 PIN 光电二极管所不及的; (2) 钽酸锂元件的输出信号与入射光功率成正比, 温度系数小、化学稳定性好, 具有较高的准确度等等。

1.1.2 优化设计调制盘 InGaAs/I 半导体激光器输出的激光为连续激光, 待测物体发出的红外辐射亦为连续辐射, 而钽酸锂热释电探测器为一种频率为 10 ~ 120Hz 的交流器件, 因此, 入射其上的光辐射必须经过调制它才能响应。为此, 本系统采用了图 4 所示的调制盘(转速 1200r/min)。

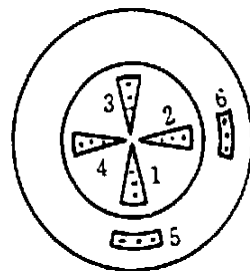


Fig. 4 Structural schematic diagram of modularizing disk

其中, 1, 2, 3 号窗口贴的是波长为 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$ 、带宽为 $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ 的窄带滤光片(这是保证温度测量精度的关键滤光片), 4 号窗口贴的是波长为 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$ 、带宽为 $\Delta\lambda = 20\text{nm}$ 的同步滤光片。依此设计, 则进入检测探测器的光脉冲是等间隔的, 其频率为 80pulse/s; 进入监测探测器的光脉冲虽为非等间隔, 但仍符合钽酸锂热释电探测器的响应要求。

1.1.3 选频放大 本系统在信号放大电路中采用了选频放大电路来滤除各种干扰以提高测温精度。选频放大电路的中心频率位于 $f_0 = (1200)/60 \times 4 = 80\text{Hz}$ 处, 带宽 $f = 10\text{Hz}$ 。这里, 为使检测探测器输出信号的频率稳定在 80Hz, 且为使调制盘输出的检测光信号等间隔以便于选频放大, 采用了音叉式精密时钟振荡器并用软件进行了 2000 分频。由于音叉式精密时钟振荡器的频率偏差不大于 10^{-5}Hz , 在 80Hz 处经 2000 分频后约为 10^{-8}Hz , 几乎为 0。因此, 光信号的频率是十分稳定的。

精选探测器——优化设计调制盘——选频放大是一条极为重要的抗干扰措施及提高测温精度的方法: (1) 它可以线性地将光信号转变成电信号, 这是实现精确测温的关键; (2) 它可以滤除 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ 以外的几乎全部的光辐射, 这是实现精确测温的保证; (3) 可以滤除电路中 50Hz 的工频及 100Hz 的倍频干扰, 这是克服电干扰以提高测温精

度的重要方法,等等。

1.2 在调制盘与探测器之间置一窄带滤光片

先分析调制盘的辐射对该系统测温精度的影响。为分析的方便,不妨假设 λ_1 及 λ_2 均不受波长的影响。据此,(1)式可简化为:

$$P_1 = \frac{D^2}{4f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_0 A_1 L d \quad (5)$$

设调制盘的温度为 T_0 ,则检测探测器接收到的、来自调制盘的辐射能 P_1 为:

$$P_1 = \frac{D^2}{4f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_0 A_1 L d \quad (6)$$

式中, λ_1 , λ_2 分别为探测器的响应下限及上限。于是,探测器接收到的总辐射能 P 为:

$$P = P_1 + P_2 \quad (7)$$

$$\text{令 } C_0 = \frac{D^2}{4f^2} A_0 A_1 L \quad (8)$$

则(5)式,(6)式可分别改写为:

$$P_1 = C_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L d \quad (9)$$

$$P_2 = C_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L d \quad (10)$$

在极窄的波段内 ($\lambda = 2.00\mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 10\text{nm}$),可以认为 L 不随 λ 的变化而变化。于是,(9)式可简化为:

$$P_1 = C_0 L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d \quad (11)$$

$$P_1 = C_0 \cdot 2 \cdot hc^2 \cdot \lambda^{-5} \left[\exp(hc/\lambda kT) - 1 \right]^{-1} \cdot \Delta\lambda \quad (11)$$

下面分两种情况讨论。

(1)当调制盘与探测器之间未置窄带滤光片时。由于钽酸锂热释电探测器的响应带宽很宽,因此,作为估算,可以用斯蒂芬-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)公式近似代替(10)式中的积分部分:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L d = T^4 \quad (12)$$

式中, $\sigma = 2^2 k^4 / (15 c^2 h^3) = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,为斯蒂芬常数。于是,(10)式可近似简化成:

$$P_1 = C_0 T^4 \quad (13)$$

下面进行定量分析。当被测物体的温度 $T = 700 \text{K}$ 时,由(11)式可以算出

$$P_1 = 4.04 C_0 \quad (14)$$

当被测物体的温度 $T = 1000 \text{K}$ 时,由(11)式可以算出:

$$P_1 = 87.92 C_0 \quad (15)$$

若调制盘的温度 T_0 等于常温,不妨取 $T_0 = 300 \text{K}$,则由(13)式可以算出:

$$P_1 = 4.59 \times 10^2 C_0 \quad (16)$$

当被测物体将调制盘加热到 $T_0 = 400 \text{K}$ 时,由(13)式也可算出:

$$P_1 = 1.47 \times 10^3 C_0 \quad (17)$$

因调制盘距被测目标较近,因此,被测温度越高,则调制盘被加热到的温度也就越高。比较(14)~(17)式,可以得出如下结论:(a)探测器探测到的、调制盘在宽带范围内的辐射能远大于待测物体在窄带范围内的辐射能;(b)调制盘的温度变化引起的宽带范围内的辐射能 P_1 的变化远大于待测物体的温度变化引起的窄带范围内的辐射能 P_1 的变化,有用的光辐射信号将被淹没在强大的噪声辐射之中。

(2)当调制盘与探测器之间置一窄带滤光片时。设窄带滤光片的中心波长为 λ ,带宽为 $\Delta\lambda$ 。则(10)式还可近似简化为:

$$P_1 = C_0 \cdot 2 \cdot hc^2 \cdot \lambda^{-5} \exp(hc/\lambda kT_0) - 1 \quad (18)$$

取 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 150\text{nm}$ 进行定量分析。当 $T_0 = 300 \text{K}$ 时,由(18)式可以算出:

$$P_1 = 6.72 \times 10^{-5} C_0 \quad (19)$$

当 $T_0 = 400 \text{K}$ 时,由(18)式同样可以算出:

$$P_1 = 2.7 \times 10^{-2} C_0 \quad (20)$$

比较(14),(15),(19),(20)4式可以看出, $P_1 \ll P_2$ 。即在调制盘与探测器之间置一窄带滤光片后,调制盘的辐射能对温度测量精度的影响可以忽略不计。

1.3 采用水冷遮蔽板并进行电气补偿

除调制盘外,窄带滤光片、探头本身的外壳、窗口和透镜等处的热辐射以及环境温度的变化也是影响该系统测温精度的因素。计算与实验结果均指出,如处理不当,这些因素带来的相对测量误差有时可以达到几个百分点。

对于这类因素引起的测量误差,本系统主要采取以下措施予以消除:(1)采用水冷遮蔽板冷却调制盘、窄带滤光片、探头的外壳、窗口及探测器的“周边环境”,使其保持相对稳定的温度。计算表明,采用这一措施后,窄带滤光片、透镜、窗口等处进入探测器的热辐射总量的变动将很小,同时也与实验结果吻合。(2)采用电气补偿法,以补偿上述窄带滤光片、透镜、窗口等处变动很小的热辐射对系统测温精度的影响。

1.4 提高系统的采样精度

光电转换系统输出的、“有意义的”电压波形的典型结构如图5所示。由图5可见,反映 P_1 (图5b中的小波)、 P_2 (图5b中的大波)及 P_3 (图5a中的波形)大小的电压波形有两个特点:一是呈梯形状;二是“平顶”不平。这些都将直接影响测温精度。对于这两个问题,本系统主要是通过选择合适的采样时

机及采样周期来解决的。

1.4.1 选择合适的采样时机 从图 5 可以看出,当同步信号的上升沿到来时,a,b 两图所示的电压信号正处在上升段。如果此时采样,则由于电压值不能正确地反映光信号的大小,因而会引入较大的误差。但只要经过适当延时,电压波形即到达“平顶”。在到达“平顶”后再启动 A/D 转换并仅在“平顶”上采样,即可消除信号的上升段不能正确地反映信号的大小这一问题对采样精度的影响。

对单个波形而言,采用什么样的采样方法最为合适?我们曾研究了以下 4 种方法:

(1) 把经过 T 延时后的第 1 次 A/D 转换值作为该单个波形的特征值;(2) 先经 T 延时,再在单个波形的“平顶”上等间隔采集 M 个点,取 M 个点的平均值作为该单个波形的特征值;(3) 经过 T 延时后,先在单个波形的“平顶”上等间隔采集 M 个点,再将其排序,取其次极大值作为该单个波形的特征值;(4) 将经过选频放大后的电压信号进行脉宽压缩(压缩至原来的 $1/20$),取信号波形与时间轴围成的面积作为该单个波形的特征值,这是本系统最初拟选用的方法。经分析与比较,本系统最终选择上述第 3 种方法作为其采样方法。

M 等于多少?由于系统选用的 A/D 转换器件

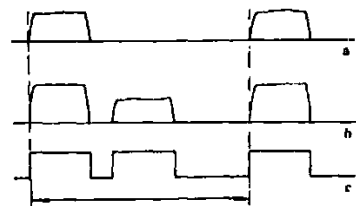


Fig. 5 Schematic diagram of the reasonable voltage waves from
a—monitoring photoelectrical system b—
measurement photoelectrical system c—
synchronus photoelectrical system

(AD574) 的转换时间约 $25\mu\text{s}$,平顶的宽度约 0.8ms ,故在单个波形的“平顶”上最多可采集到 32 个点。又由于在所采集到的点中只有通过排序才能找到次极大值,因此,若采集到的点数过多,则必然会使排序时间过长,从而导致系统的响应速度降低。经分析与比较,仅取 $M=6$ 。

1.4.2 选择合适的采样时机 每测一次温度,参与平均的信号波形取多少个?由调制盘的旋转速度 ($1200\text{r}/\text{min}$)^[1],容易算出 P_1, P_2 及 P_3 信号的周期均为 50ms 。由于电网 50Hz 工频及其 100Hz 倍频的干扰周期分别为 20ms 和 10ms ,分别是信号周期的 $2/5$ 倍和 $1/5$ 倍。因此,只需连续采集 $2N$ ($N=1, 2, 3, \dots$) 个波形累加求和取平均,即可减弱电网带来的干扰问题。

从信号平均的角度看, N 值越大,系统的抗干扰能力就越强。但 N 值过大,也即每测一次温度需要采集的波形个数越多,系统的响应速度也就越慢;另外,系统软件最后要将采集到的 A/D 值累加求和,因此,还要考虑系统的分辨力问题。综合考虑这些因素后,本系统仅取 $N=5$ 。

2 结 论

影响这一实时测温系统测温精度的因素除上面讨论的外,还有激光器入射待测面的能量、仪器的工作波长、A/D 转换器件的转换精度以及放大电路的线性程度,等等。限于篇幅,不再一一论及。

参 考 文 献

- [1] 施德恒,刘玉芳,陈玉科. 光学技术,2000,26(2):145~149.
- [2] 施德恒,刘新建,许启富 *et al.* 光学技术,2000,26(6):508~512.

(上接第 83 页)

接负)时,对于深熔焊缝的长度几乎没有影响,甚至产生负面影响。这从我们对等离子体的自由扩散分析很容易理解,反向电压抑制电子和正离子的扩散,而正向电压有利于电子和正离子的扩散,形成等离子体电流,因而电磁场对等离子体的影响就更强,反映到焊缝形态上,即为深熔焊缝长度在正向电压作用下较长。

4 结 论

(1) 在高功率激光焊接中,采用外加电磁场的方法可以影响激光等离子体的屏蔽效果。可采用外加

电磁场驱除熔池上方的激光等离子体,达到增大焊缝熔深的目的。(2) 在合适的外加电磁场参数条件下,可以获得最大激光焊接熔深。其它条件一定,磁场强度越大,焊缝熔深越大。其它条件不变,电场存在最佳电压值,此时焊缝熔深最大。

参 考 文 献

- [1] 王 勇. 激光深熔焊控制技术及其原理研究. 清华大学博士学位论文,1996.
- [2] Tse H C, Man H C, Yue T M. Optics & Lasers in Engng, 1999, 32:55~63.
- [3] 陈武柱,张旭东,任家烈 *et al.* 中国激光,1996, A23(7):657~661.