

高精度双波长非接触光纤高温计的 波长最优设计

辛 军 冯其波 林铁生
(北方交通大学物理系 北京 100044)

王 勇 姚敏言 廖延彪
(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 对实用化的高精度非接触式双波长光纤高温计的工作波长及其带宽进行了最优化设计, 获得了良好的效果。在测试范围 600~ 1360℃ 内, 测温灵敏度达到 0.1℃, 精度为 0.5℃。

关键词 双波长, 非接触, 光纤高温计

光纤高温计较其他测温仪具有测量精度高、抗电磁干扰、体积小、便于遥测等优点。由于它可应用于易燃易爆、空间狭小、直接瞄准有困难的场合, 因而受到了广泛的重视。而双波长光纤高温计可以有效地减小被测物体发射率变化、环境干扰、器件老化等因素带来的测量误差^[1~3]。

双波长光纤测温系统的最佳设计是该系统实用化的重要保证^[4,5]。优化设计的主要问题是选择最佳的两个工作波长及其带宽。如果测温系统未根据实际要求采取波长最佳设计, 则其测温曲线或者灵敏度不高或者线性不好。以往对此问题的解决办法是: 通过提高系统的信噪比及电路的放大倍率增加测温灵敏度, 通过后接非线性补偿电路或软件插值法提高测温曲线的线性。这样不但增加了系统硬件的复杂性, 而且会带来系统误差。在多数场合下, 本文所提出的优化设计方案可为实用化系统提供所需的测量灵敏度及线性。

1 双波长光纤高温计的结构与测量原理

图 1 所示为我们所采用的非接触式双波长光纤温度传感器结构。蓝宝石透镜收集被测物体的热辐射, 其焦点位于光纤端面上, 两者的数值孔径相匹配。辐射光沿多模石英光纤(芯径为 300 μm) 传输, 由定向耦合器分为两路, 经不同透过谱的滤光片形成两路探测信号。为提高信噪比和测量精度, 在透镜与传输光纤之间插入斩波器, 再进行交流放大和滤波。另外, 在传输光纤的末端加入了扰模器(光纤绕在直径 3 cm 的圆环上 3~ 5 圈), 可以部分消除因光纤弯曲、扭转等不定因素所带来的随机传输损耗, 提高系统的稳定性。实验证明, 这一新的结构对于消除测温的偶然误差十分有效。

双波长法就是利用不同工作波长的两路输出信号的比值与温度的单值关系确定物体温度。两路信号的比值由下式给出

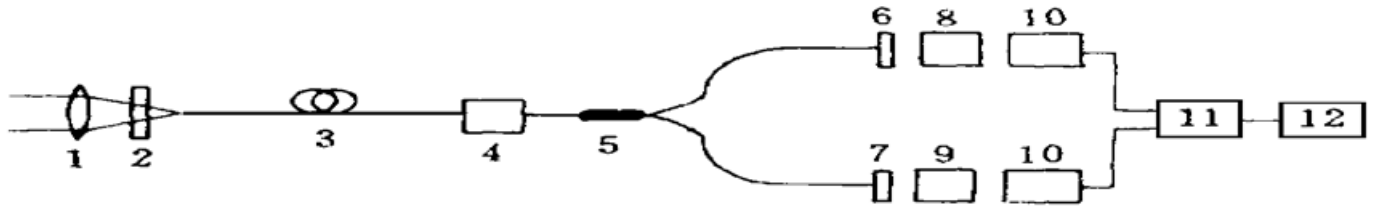


图 1 非接触式双波长光纤高温计的结构

1: 宝石透镜; 2: 斩波器; 3: 多模光纤; 4: 扰模器; 5: Y 型耦合器; 6, 7: 滤光片;
8, 9: 光电探测器; 10: 信号放大与滤波; 11: 除法器; 12: 信号处理器

Fig. 1 Configuration of the noncontact dual-wavelength fiber optic pyrometer

1: sapphire lens; 2: optical chopper; 3: multimode fiber; 4: mode filter; 5: Y-coupler; 6, 7: optical filters;
8, 9: photodetectors; 10: signal amplifier and filter; 11: divider; 12: signal processor

$$R = \frac{\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} M(\lambda, T) K_1(\lambda) D_1(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} M(\lambda, T) K_2(\lambda) D_2(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

其中, $\lambda_1, \delta\lambda_1$ 以及 $\lambda_2, \delta\lambda_2$ 分别为两个测量点处的波长和带宽。 $D_1(\lambda), D_2(\lambda)$ 为滤光片的透过率, $K_1(\lambda), K_2(\lambda)$ 为光电探测器的光谱响应, $M(\lambda, T)$ 为单色辐射度。实际应用时, 利用式(1) 绘出 $R(T) - T$ 的关系曲线, 测得 R 后查表可获知温度 T 。

2 波长的最优设计

在要求的测温范围内, 主要从测温曲线的动态范围、灵敏度、相对灵敏度、线性以及探测器光谱响应等方面考虑, 采用数值计算的办法确定出两个波长 λ_1 和 λ_2 的最佳范围。

由式(1) 可知, 比值 $R(T)$ 与温度及参数 $\lambda_1, \delta\lambda_1, \lambda_2, \delta\lambda_2$ 均有关。为便于研究, 对式(1) 进行简化计算, 设 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = \delta\lambda$, 其中 $\Delta\lambda$ 为两波长间隔, $\delta\lambda$ 为带宽。

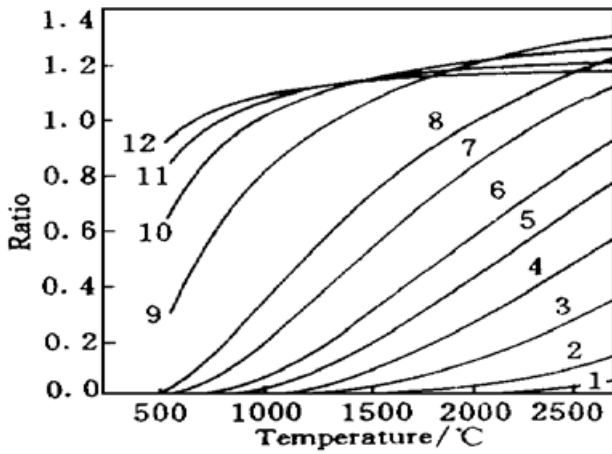
2.1 λ_1 的选取

$R(T)$ 与 T 的关系如图 2 所示, 图中的各条曲线对应于不同的参数 λ_1 。实际应用中要求的准确测温范围为 $700 \sim 2200^\circ\text{C}$ 。考查动态范围及线性, 可选择曲线 5 ~ 8, 对应 λ_1 在 $0.7 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 范围内。为表示测温曲线对温度的分辨率, 定义灵敏度 S 为温度变化 1°C 时 $R(T)$ 的变化量, 即 $S = \Delta R(T) / \Delta T$, 如图 3 所示为不同 λ_1 下的灵敏度曲线。可见在较低温度段, λ_1 取较长波长时, 曲线的灵敏度较高; 对于高温段, 则 λ_1 取较短波长时, 曲线的灵敏度较高。实际采集数据所用的是 16 位 A/D 转换器(分辨率 1.5×10^{-5}), 若要求后接二次仪表的测温灵敏度高于 0.1°C , 那么 $R(T)$ 曲线的灵敏度 S 不应低于 $3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。由此可知在 $700 \sim 2200^\circ\text{C}$ 范围内, 对于 $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, λ_1 的取值范围应在 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 之间。

为进一步比较, 定义 R 曲线的相对灵敏度 S_r 为

$$S_r = \left[\frac{\Delta R}{R} \right] \left/ \left[\frac{\Delta T}{T} \right] \right. \quad (2)$$

S_r 表示当干扰造成输出信号波动 ΔR 时, 温度的波动 $\Delta T = T \Delta R / (R S_r)$, 可见在相同条件下, 相对灵敏度 S_r 越高, ΔT 越小, 即测量精密度越高。在式(2) 中取 $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, 当 λ_1 分别为 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 时, 相对灵敏度曲线如图 4 所示。图中曲线 1 ($\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$) 的相对灵敏度较高, 曲

图 2 $R(T)-T$ 关系曲线Fig. 2 Ratio $R(T)$ versus temperature T

($\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$)

1: $\lambda_1 = 0.3 \mu\text{m}$; 2: $\lambda_1 = 0.4 \mu\text{m}$; 3: $\lambda_1 = 0.5 \mu\text{m}$; 4: $\lambda_1 = 0.6 \mu\text{m}$; 5: $\lambda_1 = 0.7 \mu\text{m}$; 6: $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$; 7: $\lambda_1 = 1.0 \mu\text{m}$; 8: $\lambda_1 = 1.2 \mu\text{m}$; 9: $\lambda_1 = 2.0 \mu\text{m}$; 10: $\lambda_1 = 3.0 \mu\text{m}$; 11: $\lambda_1 = 4.0 \mu\text{m}$; and 12: $\lambda_1 = 5.0 \mu\text{m}$

线 2 ($\lambda_1 = 1.0 \mu\text{m}$) 的相对灵敏度较低。由此可知, 对于 $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, λ_1 取值在 $0.8 \mu\text{m}$ 附近较好。同理, 对应 $\Delta\lambda = 0.1 \mu\text{m}$, λ_1 取值范围为 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。考虑到实际探测器(硅 PIN 管)的光谱响应, 选择 λ_1 在 $0.8 \mu\text{m}$ 附近。

2.2 $\lambda_2(\lambda)$ 的选取

在以上讨论中, 假定两个波长处的发射率相同(灰体条件), 由此利用 $R(T)-T$ 关系曲线得到温度 T 。实际的物体为选择性吸收体, 各波长处的发射率 ϵ 并不相同。但如果选择的 λ_1 与 λ_2 比较接近, 仍可认为 $\epsilon(\lambda_1)$ 与 $\epsilon(\lambda_2)$ 相等。

取 $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, 以 T 为自变量, $\Delta\lambda$ 为参变量, $R(\Delta\lambda, T)-T$ 关系曲线如图 5。可知 $\Delta\lambda$ 应该取 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。

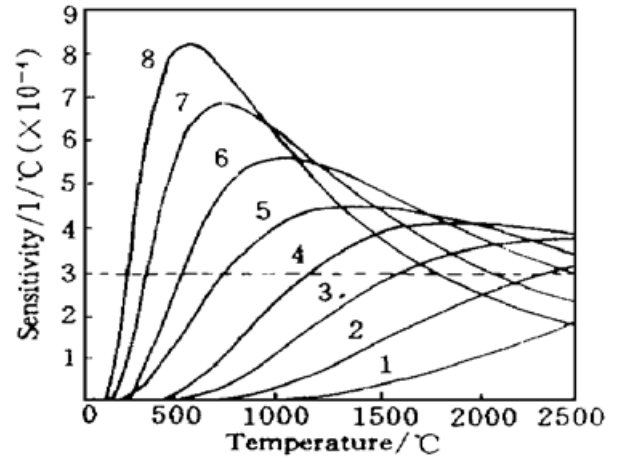
在 $700 \sim 2200^\circ\text{C}$ 温度范围内, 给定 $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, 以 λ_2 为自变量, T 为参变量, 灵敏度 $S-\lambda_2$ 关系绘于图 6。在满足灵敏度 S 不小于 $0.0003/^\circ\text{C}$ 的条件下, λ_2 应取 $0.93 \sim 1.0 \mu\text{m}$, 对应 $\Delta\lambda$ 的范围是 $0.13 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。根据以上分析, 我们选择的实用化光纤高温计的两个工作波长分别为 $0.80 \mu\text{m}$ 和 $0.96 \mu\text{m}$, 间隔 $\Delta\lambda = 0.16 \mu\text{m}$ 。

$R(T)-T$ 曲线良好的线性说明了测温范围内灵敏度均匀、测温精度一致性好。如果后接模拟仪表, 则仪表的刻度均匀, 计算与处理十分方便。对于以微机、单片机为核心的数据采集与信号处理系统, 则可依靠软件方法进一步提高线性^[6,7]。

2.3 带宽($\delta\lambda$)的选取

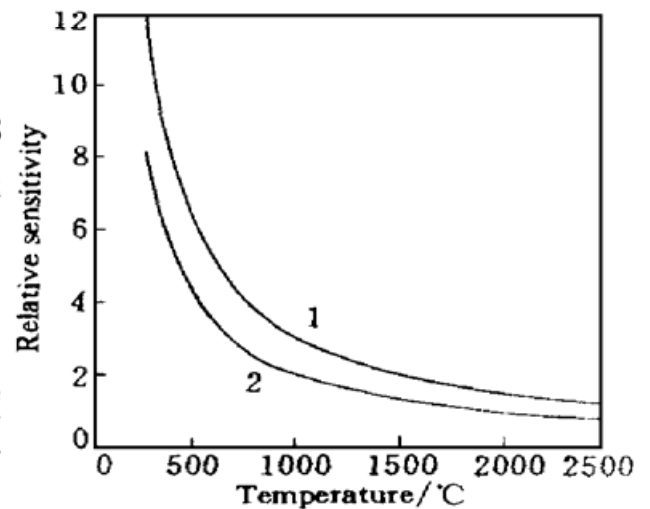
滤光片的带宽 $\delta\lambda$ 也是重要的参数。如图 7(a) 是 $R(\delta\lambda, T)-T$ 关系曲线, 图 7(b) 是灵敏度 $S-T$ 曲线, $\delta\lambda$ 为参变量。可见 $\delta\lambda$ 从 $0.01 \mu\text{m}$ 到 $0.07 \mu\text{m}$ 变动, 对 $R(T)$ 曲线的影响并不大。

被测物体表面发射率随波长及温度的变化会带来测温误差。非接触式测温时^[8,9] 以铁为

图 3 灵敏度 $S(T)-T$ 关系曲线Fig. 3 $S(T)-T$

($\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$)

1: $\lambda_1 = 0.4 \mu\text{m}$; 2: $\lambda_1 = 0.5 \mu\text{m}$; 3: $\lambda_1 = 0.6 \mu\text{m}$; 4: $\lambda_1 = 0.7 \mu\text{m}$; 5: $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$; 6: $\lambda_1 = 1.0 \mu\text{m}$; 7: $\lambda_1 = 1.2 \mu\text{m}$; and 8: $\lambda_1 = 1.4 \mu\text{m}$

图 4 相对灵敏度 $S_r(T)-T$ 关系曲线Fig. 4 $S_r(T)-T$ ($\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$)

1: $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$; 2: $\lambda_1 = 1.0 \mu\text{m}$

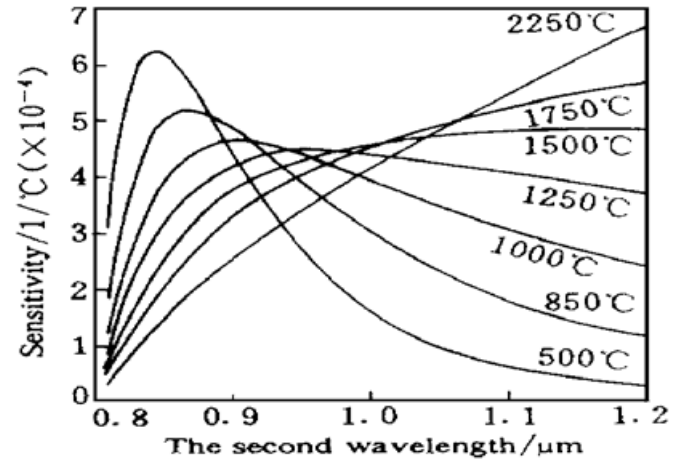
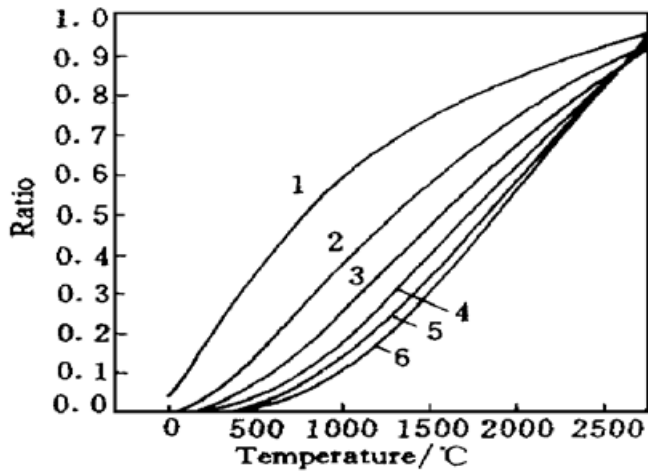


图 5 在不同的 λ_2 下, $R(T)-T$ 的关系曲线
 Fig. 5 Ratio $R(T)$ versus temperature T with $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$, and different λ_2
 1: $\lambda_2 = 0.85 \mu\text{m}$; 2: $\lambda_2 = 0.9 \mu\text{m}$; 3: $\lambda_2 = 0.95 \mu\text{m}$;
 4: $\lambda_2 = 1.0 \mu\text{m}$; 5: $\lambda_2 = 1.05 \mu\text{m}$; and 6: $\lambda_2 = 1.1 \mu\text{m}$

图 6 当 $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$ 时, 不同温度下
 计算灵敏度 S 与 λ_2 的关系
 Fig. 6 Calculated sensitivity S versus λ_2 with $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, and $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$,
 under different temperatures

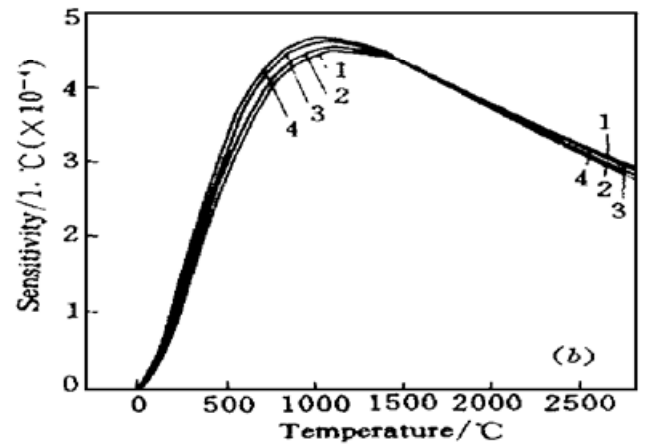
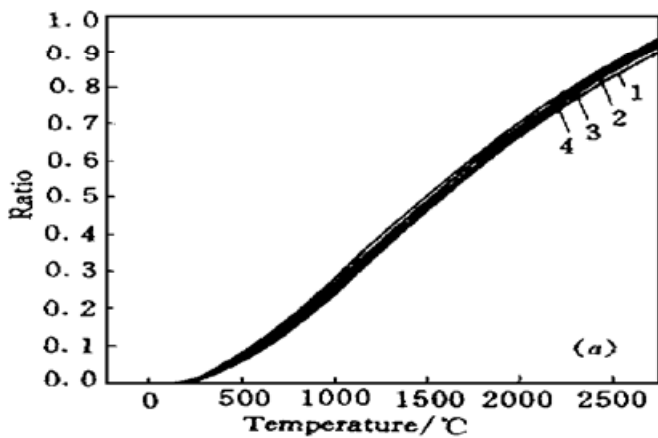


图 7 不同带宽的影响

Fig. 7 The influence of different bandwidths $\delta\lambda$. [(a) $R(T)-T$; (b) $S(T)-T$]
 1: $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$; 2: $\delta\lambda = 0.03 \mu\text{m}$; 3: $\delta\lambda = 0.05 \mu\text{m}$; and 4: $\delta\lambda = 0.07 \mu\text{m}$

被测对象, 如果假设铁的发射率在带宽内为常数, 则产生的误差如图 8 所示。可见, 带宽越大, 测温误差随温度变化也越大。为便于在未知发射率的情况下修正误差, $\delta\lambda_1$ 和 $\delta\lambda_2$ 不能太大。另一方面, 考虑到探测器的最小可探测光功率后, 则 $\delta\lambda_1$ 和 $\delta\lambda_2$ 都不能取得太小。这是因为计算 $R(T)$ 时, 需测出两个探测器的输出, 再求其比值。 $\delta\lambda$ 越大, 探测器接收的光信号越强, 信噪比越高。在要求的测温范围内, 700°C 时信号光功率最弱, 已知探测器最小可探光功率, 再考虑光路的损耗, 以及物体的发射率的影响, 代入 $M(\lambda, T)$ 的表达式, 利用数值计算的方法可以得到在 λ_1 和 λ_2 处滤光片的最小带宽分别为 $0.016 \mu\text{m}$ 和 $0.012 \mu\text{m}$ 。我们实际采用的滤光片是 $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = 0.02 \mu\text{m}$ 。

2.4 微机辅助参数选择

采用曲线作图的办法寻找最佳工作点, 虽然直观, 但难于对各参数综合考虑, 因此精度不高。为便于在不同测温范围、测温灵敏度及线性要求下选择工作波长, 特设计了波长选取软件。

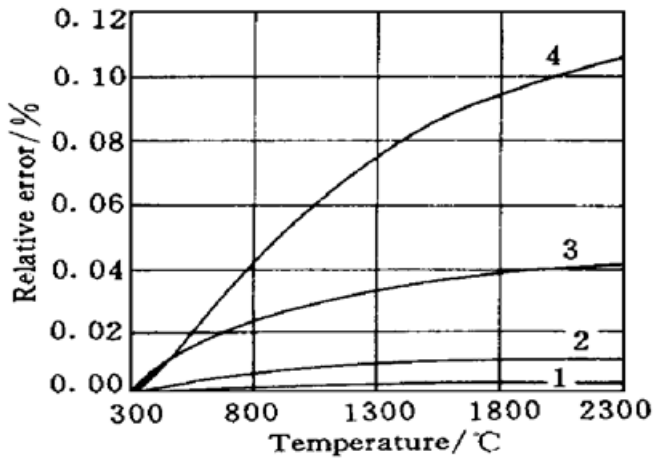


图 8 不同带宽下由发射率带来的误差

Fig. 8 Relative error resulting from emissivity with different bandwidths

- 1: $\delta\lambda = 0.005 \mu\text{m}$; 2: $\delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$;
3: $\delta\lambda = 0.02 \mu\text{m}$; and 4: $\delta\lambda = 0.04 \mu\text{m}$

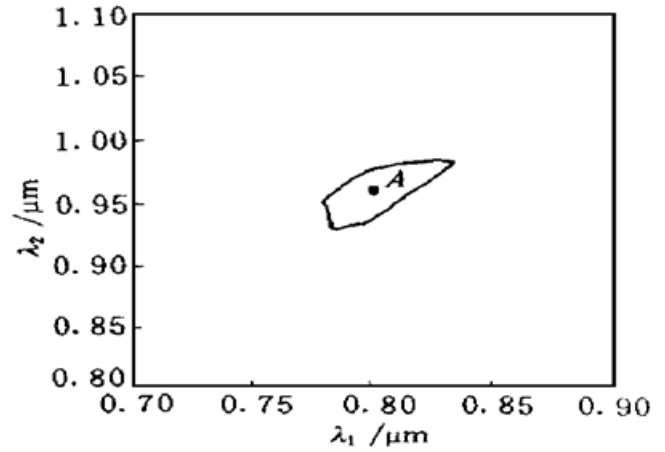


图 9 在 700~ 2200°C 范围内, 波长 λ_1 和 λ_2 的取值范围, A 点为实际工作点

Fig. 9 In the range of 700~ 2200°C, optimal region of wavelengths λ_1 and λ_2 , point A is the practical operating point

按上述方法, 在测温范围内设定优化目标, 即灵敏度、相对灵敏度、线性, 以及最小可探测光功率等, 对参数 λ_1 和 λ_2 进行优选, 可定出其最佳范围。例如给定测温范围为 700~ 2200°C, $R(T)$ 曲线的灵敏度 S 不低于 $3 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ (对应仪表的测温灵敏度优于 0.1°C), 其相对灵敏度 S_r 的最小值为 1, 非线性最大值为 1%, 以及最小可探测光功率为 10^{-8}W , 利用微机得到 λ_1 和 λ_2 的取值范围是图 9 中的闭区域。在一些情况下, 可能不存在满足要求的 λ_1 和 λ_2 。

3 实验结果

完成非接触式光纤高温计优化设计以后, 必须进行系统误差修正。测量误差主要来自两个方面: 一是被测物体表面发射率的变化、物体表面对周围环境的反射辐射以及环境中选择性吸收气体的影响; 二是测量系统自身。对于前者应根据现场实际情况采取相应措施来减小^[9], 而后者可通过计量校准来克服。理论上两光路应该是对称的, 但实际上由于光电探测器的响应度、光路损耗不同以及光纤耦合器的耦合比非 1, 使得两光路非对称。通过校准可以确定这一比值, 再调整电路的放大倍率, 修正理论曲线, 提高测量的准确度。

在现有的测试条件下, 我们所做的校准实验温度范围为 600~ 1360°C。被测物体(45 号钢)表面实际温度由热电偶读出。校准只需一个点, 我们选择最高的温度点, 因为这一点信噪比高, 误差小。非接触式光纤高温计两路信号的比值 R 与温度的关系如图 10 所示。图中的实线为理论计算曲线, 可以看到在 600°C 左右, 实际比值与理论值有较大偏差, 这是由于受光电探测器信噪比的影响。在较低温度段(600°C 左右), 第一路信号(波长 $0.80 \mu\text{m}$) 实验值与理论值偏差较大, 而第二路(波长 $0.96 \mu\text{m}$) 的偏差相对较小。在较高温度段由于信噪比高, 偏差很小。为了便于比较, 图 11 给出了两路信号及其比值与对应理论值的偏差。可见两路信号的偏差要大于比值的偏差。在温度范围 600~ 1360°C 内, 比值的相对误差 $\Delta R/R$ 小于 0.1%, 利用式(2)及图 4 可知温度的相对误差小于 0.4%, 对应温度测量精度优于 0.5°C 。

此系统应用于高炉测温及钢轨正火、淬火控温, 表明该设计方案是行之有效的。

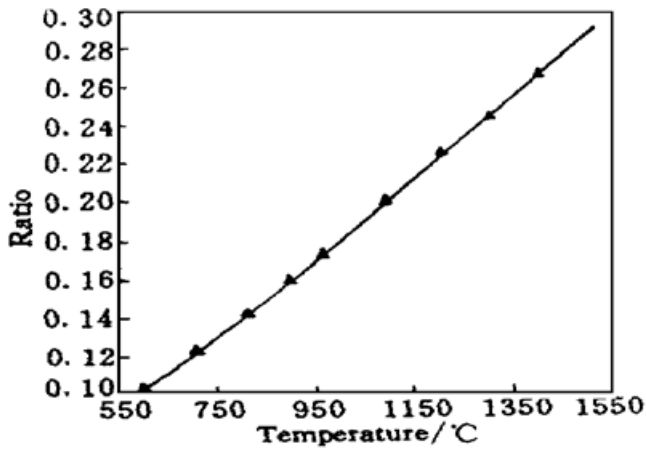


图 10 实验值与理论值的比较

Fig. 10 Comparison of the experimental and theoretical values

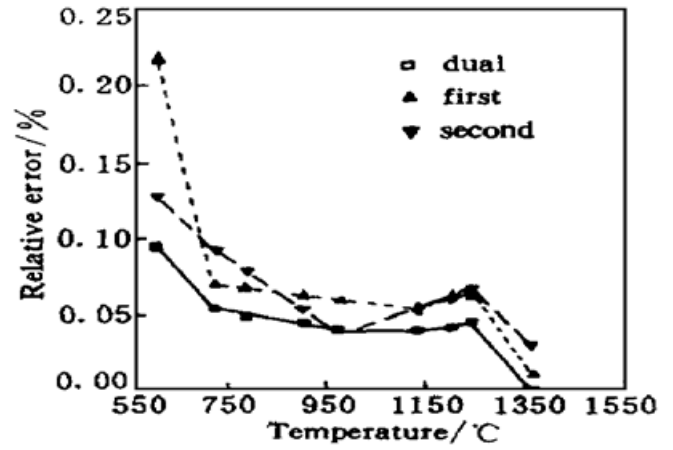


图 11 实验值的相对误差

Fig. 11 Output relative errors of experimental values

参 考 文 献

- 1 M. A. Khan, C. Allemand, T. W. Eagar. Noncontact temperature measurement $\bar{\tau}$: interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2): 392~ 402
- 2 G. B. Hunter, C. D. Allemand, T. W. Eagar. Multiwavelength pyrometer: an improved method. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(6): 1081~ 1085
- 3 J. W. Hahn, C. Rhee. Reference wavelength method for a two-color pyrometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24): 5276~ 5279
- 4 Y. Wang, M. Yao, Y. Liao. Selection of optimal working wavelengths and bandwidths for dual-wavelength optical fiber pyrometer. *Proc. SPIE*, 1995, **2594**: 75~ 80
- 5 J. G. Yang, S. R. P. Smith. Optimum parameters of dual-color high temperature measurement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报), 1991, **12**(4): 275~ 279 (in Chinese)
- 6 K. J. Xu. A software method for linearization of sensor signals. *J. Sensor & Transducer Tech.* (传感器技术), 1991, (1): 44~ 46 (in Chinese)
- 7 W. Q. Zhu. A processing method for nonlinearity of sensors. *J. Sensor & Transducer Tech.* (传感器技术), 1993, (1): 39~ 40 (in Chinese)
- 8 P. Cielo, J.-C. Krapez, M. Lamontagne *et al.*. Conical-cavity fiber optic sensor for temperature measurement in a steel furnace. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(3): 486~ 493
- 9 Wang Yong, Yao Minyan, Liao Yianbiao *et al.*. Error analysis of fiber-optic pyrometer. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(Z1): 183~ 188 (in Chinese)

Wavelength Optimization of a High-precision Noncontact Dual-wavelength Fiber-optic Pyrometer

Xin Jun Feng Qibo Lin Tiesheng Wang Yong* Yao Minyan* Liao Yianbiao*

Department of Physics, Northern Jiaotong University, 100044
 * Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, 100084

Abstract In this paper, a method of optimal parameter selection for determining two operating wavelengths and their bandwidths of a high-precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer is proposed. In the range of 600~ 1360°C, an accuracy of 0.5°C and resolution of 0.1°C are obtained.

Key words dual-wavelength, noncontact, fiber-optic pyrometer