

# 影响实用化实时测温系统测温精度的几个因素

施德恒<sup>1,2</sup>, 刘玉芳<sup>1</sup>, 孙金锋<sup>1</sup>, 朱遵略<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学 物理系, 河南 新乡 453007; 2. 空军第一航空学院 基础部, 河南 信阳 464000)

**摘要:**基于 Kirchhoff 定律, 利用半导体激光器及钽酸锂热释电探测器设计了一种实用化的实时测温系统. 从待测目标表面的红外辐射特性、待测表面周围的其它辐射体、大气的透射特性以及测温系统本身这四个角度出发, 对影响该系统测温精度的因素进行了详尽分析, 并提出了提高测温精度的相应措施. 实验结果表明, 在测温范围 673 ~ 1473K 内, 温度测量的不确定度在 0.3% 以内, 符合设计要求.

**关键词:**辐射测温; 测温不确定度; 温度测量灵敏度; 热释电探测器; 激光器  
**中图分类号:** TN247; O551.2 **文献标识码:** A

## SEVERAL FACTORS OF INFLUENCING MEASUREMENT ACCURACY FOR A PRACTICAL REAL-TIME TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM

SHI De-Heng<sup>1,2</sup>, LIU Yu-Fang<sup>1</sup>, SUN Jin-Feng<sup>1</sup>, ZHU Zun-Lue<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Based on the Kirchhoff law, a practical temperature real-time measurement system using laser diode and LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric detector was developed. According to the infrared radiation characteristics of the measurement surface, surroundings, transmission features of atmosphere and the temperature measurement system itself, detailed analyses were given on the factors of influencing temperature measurement accuracy. And the measures on improving the temperature measurement accuracy were put forward. Experimental results show that the temperature measurement inaccuracy is within 0.3%, and it is suitable for the requirements.

**Key words:** temperature measurement by radiation; temperature measurement inaccuracy; temperature measurement sensitivity; pyroelectric detector; laser diode

### 引言

研究表明, 在作者等人设计的测温系统<sup>[1]</sup>中, 仪器的工作波长与波长带宽、放大器的带宽与光学系统的相对孔径、反射辐射以及探测器本身的辐射等都能影响系统的测温精度. 文[1~4]虽已对上述各量分别进行了讨论, 但未系统地研究该仪器的测温精度. 本文拟从待测面的红外辐射特性、待测面周围的其它辐射体、大气的透射特性以及测温系统本身出发, 对影响该系统测温精度的因素进行较为详尽的研究, 并提出提高其测温精度的相应措施.

### 1 测温原理

系统的原理结构简图、调制盘的结构简图以及仪器的工作过程和标定方法等在作者们以前的工作<sup>[1,2]</sup>中已有详尽的描述, 本文不再重复. 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目标的辐射能  $P_1$

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \tau_\lambda L_\lambda d\lambda, \quad (1)$$

当有激光束进入检测探测器时, 检测探测器接收到的能量  $P_2$  则由待测目标表面反射的激光能量

及待测目标表面辐射的红外能量这两部分组成

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \tau_\lambda L_\lambda d\lambda + \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \gamma \beta \tau_\lambda E_\lambda d\lambda, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中的各量的含义在文献<sup>[3]</sup>中已有说明,这里不再重复。

由 Kirchhoff 定律,可以得出

$$\gamma = 1 - \varepsilon_\lambda, \quad (3)$$

在极窄的波段(带宽  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10\text{nm}$ )内,文献<sup>[3]</sup>已将式(1)、式(2)简化为

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda + \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可以导出

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \frac{4f'^2(P_2 - P_1)}{\pi D^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta P_3}, \quad (6)$$

其中

$$P_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda, \quad (7)$$

为入射待测目标表面的激光能量,由监测探测器监测得到.再结合黑体辐射公式

$$L_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1}, \quad (8)$$

在极窄的波段内,由式(4)可以导出

$$P_1 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda hc^2 \lambda^{-5} \cdot \Delta\lambda \cdot [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1}, \quad (9)$$

据此可以算出待测目标的温度

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \cdot \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda hc^2 \lambda^{-5} \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\varepsilon_\lambda}{P_1} \right] \right\}^{-1}, \quad (10)$$

式(10)中, $h$ 为 Planck 常数; $k$ 为 Boltzmann 常数; $c$ 为光速.

## 2 影响实时测温系统测温精度的几个因素

影响该系统测温精度的因素很多,但归纳起来,可以将其分为以下4个方面:

### 2.1 待测目标的红外辐射特性

#### 2.1.1 相对温度灵敏度及测温范围对测温精度的影响

当无激光束入射待测目标表面时,热释电探测

器输出的电信号的强度  $V(T)$  可以写成<sup>[5]</sup>

$$V(T) = R(\lambda) P_1, \quad (11)$$

式(11)中, $R(\lambda)$ 为钽酸锂探测器的光谱响应度<sup>[5]</sup>.

为分析上的方便,取  $R(\lambda) = 1$ . 于是,式(11)可简化为

$$V(T) = P_1, \quad (12)$$

文献[2]已详细讨论了探头的温度分辨力.但仪器的测温精度不仅受探头的温度分辨力的制约,而且还受二次仪表的测温灵敏度的约束.对本仪器而言,二次仪表的测温灵敏度又由  $V(T) \sim T$  曲线的温度灵敏度(相对温度灵敏度)、电路的放大倍率及 A/D 转换器件的分辨率所决定<sup>[6]</sup>. 由于  $V(T) \sim T$  曲线是进行温度测量的基础,因此为保证二次仪表的测温灵敏度,必须优化  $V(T) \sim T$  曲线以使其具有最佳的温度灵敏度(相对温度灵敏度).

$V(T) \sim T$  曲线的温度灵敏度  $S$  定义为当待测温度每变化  $1^\circ\text{C}$  时,探测器输出的信号电平的变化量<sup>[5,6]</sup>,即

$$S = \frac{\Delta V(T)}{\Delta T}, \quad (13)$$

据此容易写出某一温度点处  $V(T) \sim T$  曲线的温度灵敏度

$$S = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda \left( \varepsilon_\lambda \frac{\partial L_\lambda}{\partial T} + L_\lambda \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial T} \right) d\lambda \right], \quad (14)$$

测量是在极窄的波段内进行的.在这样窄的波段内,可以认为  $\varepsilon_\lambda$  及  $\tau_\lambda$  均与波长无关;又由于本仪器的测量对象的  $\varepsilon_\lambda \approx 0.52 \sim 0.56$ ,作为近似分析,也可以认为  $\varepsilon_\lambda$  与温度  $T$  无关,因此有  $\frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial T} \approx 0$ . 进而可将上式简化成:

$$S = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L_\lambda}{\partial T} d\lambda \quad (15)$$

如果将待测面的温度每变化  $1^\circ\text{C}$  时,  $V(T) \sim T$  曲线的相对变化量定义为  $V(T) \sim T$  曲线的相对温度灵敏度  $S_r$ <sup>[6]</sup>

$$S_r = \frac{\left( \frac{\Delta V}{V} \right)}{\left( \frac{\Delta T}{T} \right)}, \quad (16)$$

据此可以导出某一温度点处  $V(T) \sim T$  曲线的相对温度灵敏度  $S_r$ ,

$$S_r = \frac{hc}{k} \cdot \frac{1}{\lambda T} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}, \quad (17)$$

以  $S_r$  为纵坐标、以  $\lambda T$  为横坐标作出的  $S_r \sim \lambda T$  曲

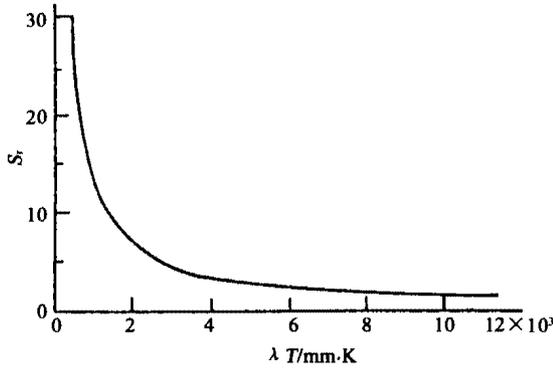


图1 相对温度灵敏度  $S_r$  随  $\lambda T$  的变化曲线  
Fig. 1 Curve of relative sensitivity  $S_r$  versus  $\lambda T$

线,如图1所示.

由图1可以看出,当  $\lambda T < 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  时,  $S_r \sim \lambda T$  曲线十分陡峭,也即  $S_r$  随  $\lambda T$  的变化十分灵敏.这说明,当系统的工作波长  $\lambda = 2.00 \mu\text{m}$  时,若被测温度  $T \leq \frac{2898}{2.00} = 1449 \text{K}$ ,只要被测温度有微小的变动,就能引起  $S_r$  较大的变化.

下面讨论  $S_r$  与测温精度  $\Delta T$  的关系.为此将式(16)改写成

$$\Delta T = T \Delta V(T) / [V(T) S_r], \quad (18)$$

式(18)表明,当干扰光造成探头输出的电信号波动  $\Delta V(T)$  时,因该光干扰引起的温度波动为  $T \Delta V(T) / [V(T) S_r]$ .因此,相对温度灵敏度  $S_r$  越高,则  $\Delta T$  越小,也即测量结果越准确.

本仪器要求准确测量的温度范围为  $400 \sim 1200^\circ\text{C}$ ,系统的工作波长  $\lambda = 2.00 \mu\text{m}$ .由上述分析可见,系统要求的准确测温范围正好落在系统能够较精确测量的范围,这是本系统使用辐射峰值的左半部分进行温度测量的重要原因之一.

### 2.1.2 待测目标的发射率的测量精度对测温精度的影响

下面讨论  $\epsilon_\lambda$  的测量精度对测温精度的影响.为此,将式(4)两端取对数,化简后再取微分,有

$$\left| \frac{dT}{T} \right| = \frac{\lambda T^2}{2c_2} \cdot \left( \left| \frac{dP_1}{P_1} \right| + \left| \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right| \right), \quad (19)$$

这里  $c_2 = hc/k = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ,  $\left| \frac{dP_1}{P_1} \right|$  为无激光束入射待测表面时检测探测器的相对测量不确定度;

$\left| \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right|$  为待测表面发射率  $\epsilon_\lambda$  的相对测量不确定度.

为直观地观察  $\epsilon_\lambda$  的测量精度对测温精度的影响,不妨取  $\left| \frac{dP_1}{P_1} \right| = 0$ .则式(20)可简化成<sup>[5]</sup>

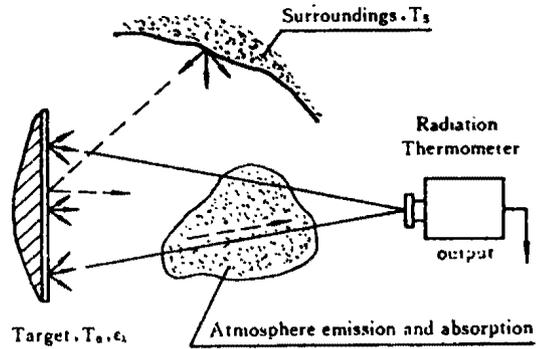


图2 目标周围的其它辐射体及大气对实时测温系统测温精度的影响简图

Fig. 2 Schematic diagram of the effects of surroundings and atmosphere on the temperature measurement system

$$\left| \frac{dT}{T} \right| = \frac{\lambda T^2}{2c_2} \left| \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right|, \quad (20)$$

由式(20)可以得出:(1)随着  $\lambda T$  的减小,发射率的测量精度对测温精度的影响减小.但在辐射能量的峰值处,发射率5%的测量不确定度可引起温度1%的测量不确定度;(2)对本系统而言,其工作波长  $\lambda = 2.00 \mu\text{m}$ .因此在低温处,发射率的测量精度对温度测量精度的影响较小;但在高温处,这种影响就比较明显.由于本系统的测温上限为  $1200^\circ\text{C}$  (基本上处于辐射的峰值处),因此发射率的测量不确定度最多只有其1/5传递给了温度的测量不确定度.这是本系统使用辐射峰值的左半部分进行温度测量的又一重要原因.

## 2.2 待测表面周围的其它辐射体

### 2.2.1 待测表面周围的其它辐射体对测温精度的影响

假定待测面附近存在着其它红外辐射源(见图2).若在其一特定的立体角内,待测面沿各个方向都具有相同的辐出度(这种面也叫 Lambertian Sur-

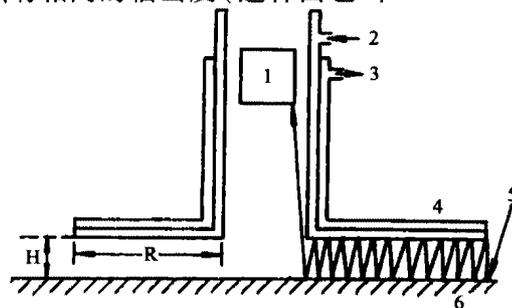


图3 水冷遮蔽板遮蔽原理示意图 1. 探头; 2. 给水; 3. 排水; 4. 水冷遮蔽板; 5. 入射; 6. 被测物体表面

Fig. 3 Schematic diagram of water-cooled shelter plate 1: detector; 2: water in; 3: water out; 4: water-cooled shelter plate; 5: incident ray; 6: the measured surface

face<sup>[5]</sup>), 则来自待测面的辐出度  $M_e$  可表示为

$$M_e = \varepsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \varepsilon_\lambda) L_{\lambda, T_s}, \quad (21)$$

式(21)中的各量的含义见文献[4], 文献[4]利用式(21)对反射辐射进行了详尽的分析. 得出: 当  $\varepsilon_\lambda = 0.10$  时, 对于  $T_0 = 900\text{K}$  的待测目标而言,  $T_s = 900\text{K}$  的背景辐射足以引起 40% 的测温不确定度.

### 2.2.2 为克服这种影响所采取的措施

采用水冷遮蔽板(见图 3)是抑制反射辐射对测温精度影响的有效措施. 在作者等以往的研究<sup>[4]</sup>中, 只是定性的给出了水冷遮蔽板的设计原则, 但未求出  $H/R$  之值.

计及水冷遮蔽板的累次反射后, 文[7]导出了待测面对外界辐射的反射率  $K$  的表达式

$$K = (1 - \varepsilon_\lambda) \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right), \quad (22)$$

则采用水冷遮蔽板后, 式(21)可改写成

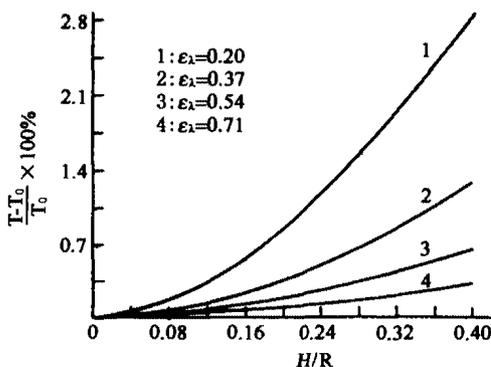
$$M'_e = \varepsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \varepsilon_\lambda) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right) L_{\lambda, T_s}, \quad (23)$$

进而可以将探测器接收到的辐射能  $P_{1, T_0}$  写成

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta (1 - \varepsilon_\lambda) \tau_\lambda \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_s} d\lambda \quad (24)$$

下面进行定量分析. 联合式(4)、式(24), 在  $T_0 = 800\text{K}$ 、 $T_s = 800\text{K}$ , 不同的发射率下作出的相对测量不确定度随  $H/R$  的变化曲线, 如图 4(a) 所示.

从图 4(a) 可以看出, (1) 在其它条件都相同的



情况下, 尺寸、放置方法相同(即,  $H/R$  的值相同)的水冷遮蔽板对低辐射( $\varepsilon_\lambda$  较小)表面而言, 其遮蔽效果差, 对高辐射( $\varepsilon_\lambda$  较大)表面而言, 其遮蔽效果好. 这与以前采用光线追迹法进行分析时得出的结论是相同的<sup>[4]</sup>; (2) 随着  $H/R$  的减小, 遮蔽板的遮蔽效果渐好. 当  $H/R$  小到一定程度(如  $H/R = 0.05$ ) 时, 即使对  $\varepsilon_\lambda = 0.20$  这样低辐射的待测表面, 遮蔽板的遮蔽效果也能达到较为理想的程度.

本文以抛光的钢铸件作为测量对象<sup>[1-4]</sup>. 其发射率  $\varepsilon_\lambda = 0.52 \sim 0.56$ . 为此作者考察了  $\varepsilon_\lambda = 0.52$ 、 $T_0 = 1000\text{K}$  时, 在不同的  $H/R$  下由式(4)、式(24)联合作出的温度相对测量不确定度随背景辐射温度的变化曲线, 如图 4(b) 所示. 显见, (1) 其它条件都相同时, 背景温度越高, 则其遮蔽效果越差; (2) 当  $H/R = 0.1$  时, 对相同于被测温度的背景辐射温度而言, 其遮蔽效果几乎已达到令人满意的地步.

实际应用时, 是针对生产线上运动着的钢铸件进行测温的. 因此  $H/R$  值的选择, 应根据环境辐射的具体情况确定. 需要说明的是, 即便是对运动着的钢铸件进行测温,  $R$  值也不能太小, 否则被测表面有被水冷却的危险.

### 2.3 大气的透射特性

由误差传递理论, 式(6)的极值误差可用下式表示:

$$\left|\frac{d\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_\lambda}\right| = \left|\frac{dP_1}{P_1}\right| + \left|\frac{dP_2}{P_2}\right| + \left|\frac{dP_3}{P_3}\right| \quad (25)$$

由式(20)、式(25)可以看出, 发射率及测温精度由  $P_1$ 、 $P_2$  及  $P_3$  的测量精度所决定.

一般情况下, 进入光路中的水蒸气、 $\text{CO}_2$  等的光谱吸收都会成为外界干扰而影响  $P_1$ 、 $P_2$  及  $P_3$  的测

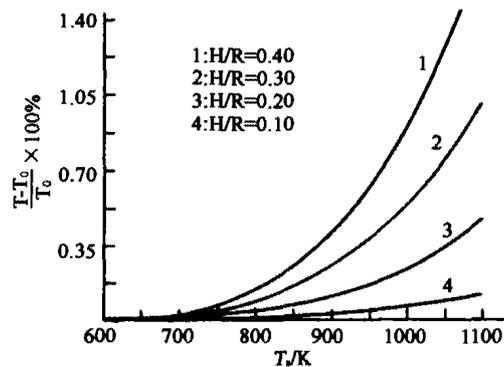


图 4 遮蔽板尺寸分析 (a) 当  $T_0 = 800\text{K}$ 、 $T_s = 800\text{K}$  时, 在不同的发射率下, 相对测量不确定度随遮蔽板尺寸的变化曲线 (b)  $\varepsilon_\lambda = 0.52$ 、 $T_0 = 1000\text{K}$  时, 在不同  $H/R$  下, 相对测量不确定度随背景温度的变化曲线

Fig. 4 Size analysis of shelter plate (a) Relative measurement errors vs. shelter plate sizes at  $T_0 = 800\text{K}$  and  $T_s = 800\text{K}$  and different spectral emissivity (b) Relative measurement errors vs. background temperature at  $\varepsilon_\lambda = 0.52$  and  $T_0 = 1000\text{K}$  and different sizes of shelter plate

量精度. 文献<sup>[3]</sup>给出了1.0~3.0 $\mu\text{m}$ 内海平面300m长度的路径上大气的透射光谱曲线. 由文献<sup>[3]</sup>可见, 在1.0~3.0 $\mu\text{m}$ 范围内, 只要系统的工作波长位于1.0~1.1 $\mu\text{m}$ 、1.2~1.3 $\mu\text{m}$ 、1.5~1.8 $\mu\text{m}$ 、2.0~2.4 $\mu\text{m}$ 的区域, 就能避开 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 等的光谱吸收.

本系统的工作波长为2.00 $\mu\text{m}$ , 正好落在2.0~2.4 $\mu\text{m}$ 区域内, 因此能避开 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 等的光谱吸收而使大气的透射特性对测温精度的影响最小化.

显然, 如不计及大气的光谱吸收效应, 将会导致测得的温度偏低.

#### 2.4 测温系统本身

测温系统的结构设计及其测温方法是影响测温系统测温精度的重因素. 测温时, 探测器接收到的信号, 既有被测面的温度信号, 又有周围环境的温度信号; 后续电路中处理的信号, 既有探测器接收到的光辐射信号, 又有探测器及其后续电路产生的噪声信号. 具体地讲, 可以将其划分成4类:

(1) 产生于光学器件的制作方面: 如窄带干涉滤光片的中心波长及其波长带宽的制作准确度; 窄带干涉滤光片的透光均匀度; 调制盘的对称性与偏心度以及光学器件的排列结构等;

(2) 产生于温度的测量过程: 如检测探测器、监测探测器测量 $P_1$ 、 $P_2$ 及 $P_3$ 的准确度; 等等;

(3) 产生于温度的测量方法: 如标定过程中参考温度的实现和标定的准确性以及温度计算方法的近似程度, 等等;

(4) 产生于探测器及电路的噪声: 如产生于探测器、放大电路、多路模拟开关、采样保持电路以及模-数转换过程的噪声信号, 等等.

由(1)、(2)、(3)所产生的测温不确定度十分复杂. 限于篇幅, 作者将另文讨论. 本文仅简单分析由(4)所产生的随机测温不确定度.

探测器的噪声及电路的噪声所产生的随机测温不确定度可用下式表示

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{PD}^2 + \varepsilon_{AMP}^2 + \varepsilon_{MUX}^2 + \varepsilon_{SH}^2 + \varepsilon_{AD}^2}, \quad (26)$$

式(26)中,  $\varepsilon_{PD}$ 为探测器产生的随机噪声误差;  $\varepsilon_{AMP}$ 为放大电路产生的随机噪声误差;  $\varepsilon_{MUX}$ 为多路模拟开关产生的随机噪声误差;  $\varepsilon_{SH}$ 为采样保持电路产生的随机噪声误差;  $\varepsilon_{AD}$ 为模-数转换电路产生的随机噪声误差. 采用性能优良的探测器, 可使 $\varepsilon_{PD}$ 很小;

精选电路器件, 可使 $\varepsilon_{AMP}$ 、 $\varepsilon_{MUX}$ 及 $\varepsilon_{SH}$ 更小. 因此主要考虑模-数转换误差. 这种误差主要包括量化误差、非线性误差、失调误差及增益误差. 采用性能优良的16位A/D转换器件并尽可能增大信号的幅度(0~10V输入), 可令人满意的解决这一问题.

### 3 结语

本文从待测目标的红外辐射特性、待测目标周围的其它辐射体、大气的透射特性以及测温系统本身这4个方面出发, 讨论了引起测温不确定度的多个因素, 重点分析和讨论了系统的测温不确定度, 并采取了一系列提高测温精度的措施. 实践证明这些措施都是行之有效的.

### REFERENCES

- [1] SHI De-Heng, HUANG Guo-Qing, LIU Yu-Fang, et al. Optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Acta Optica Sinica* (施德恒, 黄国庆, 刘玉芳, 等. 一种实用化实时测温系统的优化设计, *光学学报*), 2003, 23(11): 1394—1401.
- [2] SHI De-Heng, HUANG Guo-Qing, LIU Yu-Fang. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers* (施德恒, 黄国庆, 刘玉芳. 一种实用化实时测温系统的工作波长的最优设计. *中国激光*), 2003, 30(6): 545—550.
- [3] LIU Yu-Fang, SHI De-Heng, CHEN Yu-Ke, et al. Laser source optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘玉芳, 施德恒, 陈玉科等. 一种实用化实时测温系统激光光源的最佳选择. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 297—302.
- [4] SHI De-Heng, LIU Yu-Fang, Sun Jin-Feng, et al. Effect and control on temperature measurement accuracy of real-time temperature measurement system by detector system itself [J]. *Chinese Journal of Lasers* (施德恒, 刘玉芳, 孙金锋等. 反射辐射和探测器本身的辐射对实时测温系统测温精度的影响及其抑制. *中国激光*), 2004, 31(1): 105—110.
- [5] Dewitt D P, Inferring temperature from optical radiation measurement [J]. *Opt. Eng.*, 1986, 25(4): 596—601.
- [6] XIN Jun, FENG Qi-Bo, LIN Tie-Sheng, et al. Wavelength optimization of a high-precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer [J]. *Chinese Journal of Lasers* (辛军, 冯其波, 林铁生, 等. 高精度双波长非接触光纤高温计的波长最优设计. *中国激光*), 1999, A26(2): 121—126.
- [7] Tamura Y, Tatsuwaki M, Sugimura T, et al. "Temperature measurement of steel in the furnace", In: "Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry" [C]. New York: American Institute of Physics, 1982, 5: 505—512.