

# 细分光谱高温测温线性拟合方案的研究

吴继友

(山东大学光电子信息工程系, 山东, 济南, 250100)

**摘要** 按照 PIS-A 型瞬态光谱仪的数据格式, 用普朗克公式计算 1000~6000 K 黑体的光谱辐射代替实测辐射, 分析了减小线性拟合方案测温误差的方法. 研究表明, 适当选择参与拟合数据波长的上下限、提高信噪比和 A/D 转换位数, 并对维恩近似带来的系统误差进行校正补偿等措施, 可有效提高测温精度.

**关键词** 细分光谱, 高温测温, 线性拟合, 测量误差.

## 引言

以快速非接触为特点的辐射测温技术应用日益广泛, 但由于未知目标发射率, 使辐射测温的精度难于与接触测温的精度相比. 许多科学家研究用现场测得目标发射率再进行修正或比色测温的方法来精确测量灰体目标的真温<sup>[1~3]</sup>. 随着多元列阵光辐射探测器和计算机技术的发展, 细分光谱测温将成为精确测量灰体真温的研究方向之一. 鉴于线性拟合方案具有程序简单, 运算速度快的优点, 本文给出线性拟合方案基本原理, 按照 PIS-A 型瞬态光谱仪的输出数据格式, 模拟了 1000~6000K 黑体目标的线性拟合测温过程, 给出减小误差的方法, 并用 PIS-A 型瞬态光谱仪多次重复测得几组电流电压下钨卤素灯灯丝的温度.

## 1 线性拟合方案的基本原理

设目标为灰体扩展源, 绝对温度为  $T$ , 发射率为  $\epsilon$ , 按普朗克公式, 目标的光谱辐射出射度为

$$M(\lambda) = \frac{\epsilon C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\lambda$  为波长 (nm),  $C_1$  为第一辐射常数  $=3.741844 \times 10^{16} \text{W} \cdot \text{nm}^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $C_2$  为第二辐射常数  $=14388330 \text{nm} \cdot \text{K}$ ,

当  $\lambda T \ll C_2$  时, 式 (1) 可近似为维恩公式:

$$M(\lambda) = \varepsilon C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T}, \quad (2)$$

对式 (2) 两边取对数并移项整理可得

$$Y = AX + B, \quad (3)$$

式 (3) 中,

$$X = \frac{C_2}{\lambda}, \quad (4)$$

$$Y = \ln[M(\lambda)] + 5 \ln \lambda, \quad (5)$$

$$A = -\frac{1}{T}, \quad (6)$$

$$B = \ln(\varepsilon C_1), \quad (7)$$

如果用光度定标过的光谱仪测得  $n$  组波长  $\lambda$  和对应的辐射出射度  $M(\lambda)$  数据, 则可根据式 (4) 和式 (5) 算得  $n$  组  $X$ 、 $Y$  值, 用线性拟合 (回归) 法<sup>[4]</sup>可求得

$$A = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \quad (8)$$

$$B = \bar{Y} - A\bar{X}, \quad (9)$$

式 (8) 和式 (9) 中

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (10)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (11)$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (12)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}), \quad (13)$$

由式 (6) 和式 (7) 可求得

$$T = -\frac{1}{A}, \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{e^B}{C_1}, \quad (15)$$

$T$  即为测得的目标真实温度. 对扩展源来说, 求得的  $\varepsilon$  即为目标的实际发射率, 对不满足扩展源条件的目标来说,  $\varepsilon$  小于实际发射率.

图 1 表明当  $T=2000\text{ K}$ , 普朗克公式 (1)(实线) 和维恩公式 (2)(虚线) 在  $\lambda T \ll C_2$  时 (峰值前段) 近似等效的情况. 图 2 给出经式 (4) 和式 (5) 变换后的  $X$ 、 $Y$  的线性关系,  $X$ 、 $Y$  中隐含的  $\lambda$ 、 $M(\lambda, T)$  的单位与图 1 相同. 由于  $X$  与波长  $\lambda$  成反比关系, 所以  $X$  坐标轴的低端和高端分别与  $\lambda$  坐标轴的高端和低端对应.

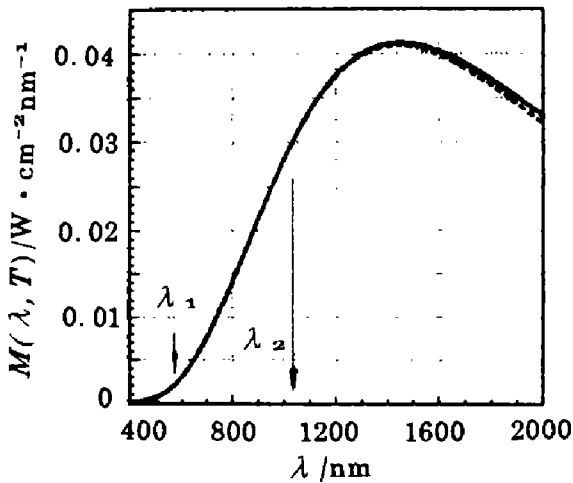


图 1 维恩公式对普朗克公式的等效近似  
Fig. 1 Approximation of Wien's formula to the Planck's formula

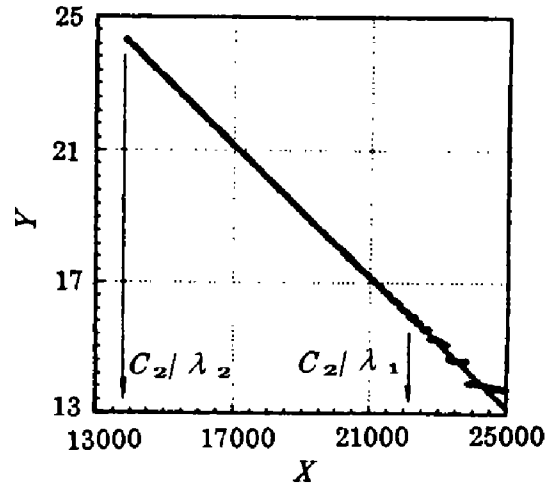


图 2  $X$ 、 $Y$  的线性关系  
Fig. 2 The linear relationship between  $X$  and  $Y$

## 2 线性拟合方案测温误差来源

关于目标对灰体特性的偏离和对环境辐射的反射产生辐射测温误差文献 [1, 2, 5] 已有明确论述. 对于细分光谱线性拟合方案所得温度的误差来源, 本文着重研究以下几点:

(1) 光度测量 A/D 转换中有限有效数字带来的误差. 可用提高 A/D 转换位数和限制拟合所用光度数据的最低数值, 取合适波长范围来减小其误差.

(2) 维恩公式 (2) 近似代替普朗克公式 (1) 带来的误差. 该误差属于系统误差, 可通过校正来补偿.

(3) 噪声带来的误差, 可用提高信噪比的方法减小其误差.

(4) 细分光谱仪光度定标不准或目标辐射特性偏离灰体特性带来的误差, 可用提高定标精度或舍去偏离灰体辐射特性的波长数据来消除.

## 3 线性拟合方案的研究方法与结果

PIS-A 型瞬态光谱仪用光栅分光, 用 512 元线列硅光电二极管接收. 为提高信噪比, 可自动重复测量多次 (几次至几百次), 将光度数据累加, 取小于 255 (对应 8 位二进制的整数, 由机内 RAM 存储. 512 组光度数据和累加次数可通过 RS-232C 串行口输至计算机, 求光度数据平均值, 由线性拟合方案编写的程序计算出目标的绝对温度  $T_C$ .

为扩大研究温度范围, 缩小研究温度间隔及简化实测手续, 采用由普朗克公式计算黑体辐射数据代替实际黑体辐射的方法来进行本项模拟研究, 这可避免杂散光的干扰. 研究

的步骤及结果如下:

(1) 按照 PIS-A 型光谱仪的输出数据格式, 用电子计算机计算绝对温度为  $T$  的黑体辐射产生的光谱数据, 然后用线性拟合方案程序处理, 算出对应的绝对温度  $T_C$  和对应的测温相对误差  $\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - T_C}{T}$ . 其计算框图如图 3 所示. 图 3 中,  $R(\lambda)$  为 PIS-A 型光谱仪的光谱响应度.

(2) 选择参与拟合光度数据的最小值  $D_0$ , 用以确定线性拟合所用的低波长限  $\lambda_1$ , 选用光谱仪的上限 1038.75 nm 作为线性拟合所用的高波长限  $\lambda_2$ . 算得 1000~2000 K 范围内多个温度黑体目标 (如每隔 100 K 的 11 个或更多) 分别对应一系列  $D_0$  的测温相对误差  $\frac{\Delta T}{T}$ , 由此可得多条  $D_0$  与  $\frac{\Delta T}{T}$  的关系曲线 (见图 4).  $D_0$  取值 7 以下时对应图 1 中取  $\lambda_1$  以下的数据, 光度数据曲线的低平及数据取整数造成图 2 中 X 高段的一系列平台数据, 所得拟合直线斜率  $A$  绝对值多数偏低, 导致  $T_C (= -\frac{1}{A})$  偏高及相对测温误差  $\frac{T - T_C}{T}$  多为绝对值较大的负值;  $D_0$  取值 15 以上时, X 高段的平台数据已很少, 相对突出了 X 低段 (对应  $\lambda$  高段) 的维恩公式与普朗克公式相对差异大的数据部分, 导致较多正值相对误差的上升. 所以, 用  $D_0$  在 7~15 之间取值 (如取中间值 11) 来确定波长下限  $\lambda_1$ , 可得到相对较小的测温相对误差.

(3) 取  $D_0$  为 11, 每隔 10 K, 用步骤 1 中所述方法计算出对应黑体温度  $T$  从 1000

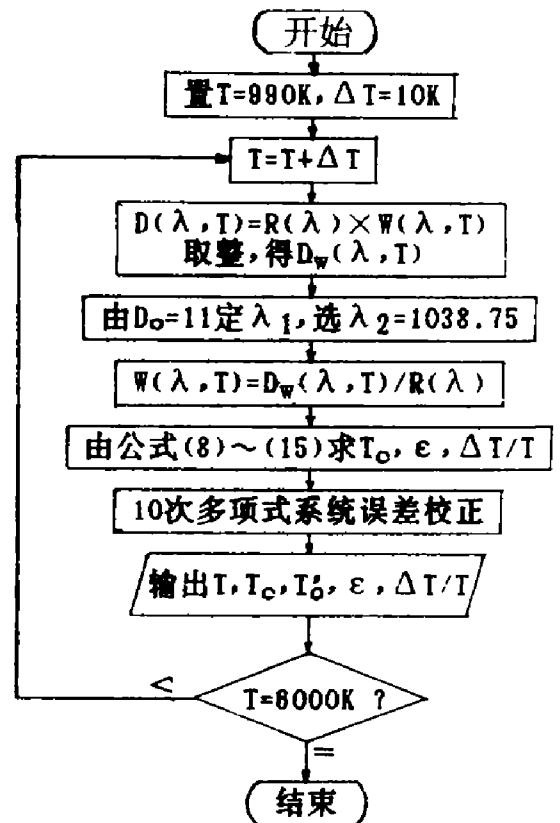


图 3 计算框图  
Fig. 3 Block diagram of computation

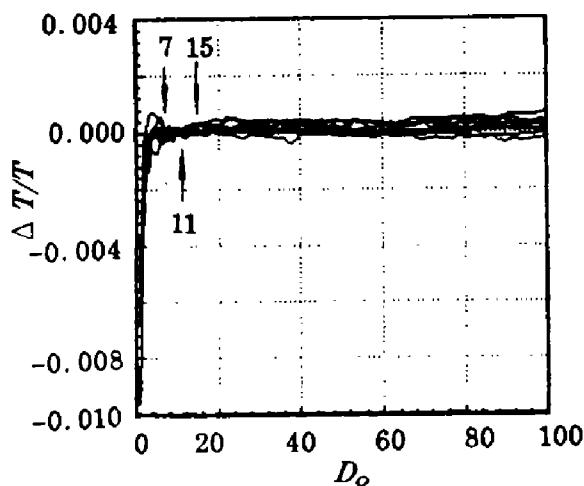


图 4 最佳  $D_0$  值的选择  
Fig. 4 The optimum choice of  $D_0$  value

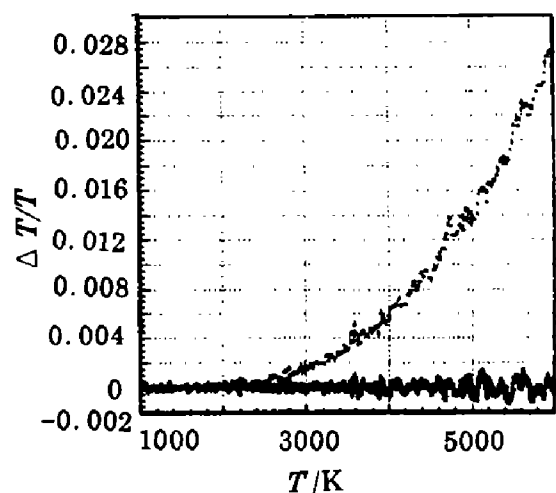


图 5 1000~6000 K 的测温相对误差曲线  
Fig. 5 The relative measurement error curves for blackbody of 1000~6000 K

~6000 K 的线性拟合温度  $T_C$  和相对误差  $\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - T_C}{T}$  (见图 5 中点线). 在 2000 K 以上, 图 5 中点线逐渐升高, 这是随温度升高维恩公式偏离普朗克公式逐渐加大导致系统误差加大的结果.

对真实温度  $T$  - 拟合温度  $T_C$  曲线进行 10 次多项式拟合, 求得 10 次多项式系统误差校正曲线的各项系数, 用以对  $T_C$  校正, 得校正温度  $T'_C$  来对应黑体目标的实际温度  $T$ , 再算得校正后的相对误差  $\frac{T - T'_C}{T}$  (见图 5 中点线). 从图 5 可见, 经校正, 曲线克服了在 2000 K 以上维恩公式近似带来的较大相对误差. 校正后, 在 1000~6000 K 范围内, 最大相对误差不超过  $\pm 0.002$ , 一般在  $\pm 0.001$  以内. 目标温度在 2000 K 以下, 不用校正就有较高精度, 相对误差均在  $\pm 0.0005$  以内, 这是由于维恩公式与普朗克公式在 2000 K 温度以下, 在 400~1038.75 nm 波段范围内差别极小的结果.

(4) 设定 PIS-A 型光谱仪光度输出数据所取最高有效数字分别为 255、511、1023 和 2047 (对应 A/D 转换二进制位数  $B$  分别为 8、9、10 和 11), 对 1000~6000 K 每隔 10 K 的黑体目标所算得的相对误差绝对值取平均值  $\left| \frac{\Delta T}{T} \right|$ , 可得  $\left| \frac{\Delta T}{T} \right|$  与  $B$  的关系如图 6 所示. 由图 6 可见, 测温相对误差随光谱仪所取 A/D 转换位数  $B$  的增加而减小.

(5) 在普朗克公式算得的光度数据基础上附加不同幅度的高斯噪声数据, 再用线性拟合法计算黑体目标的温度, 得噪声有效值  $N_{\text{有效值}}$  与相对误差绝对值平均值的关系曲线如图 7 所示. 由图 7 可见, 随噪声的降低, 测温相对误差也降低, 则测温精度提高.

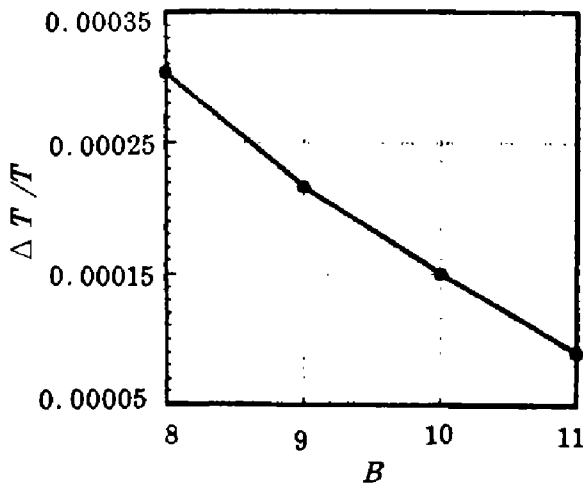


图 6 光度数据二进制有效数字  $B$  与测温相对误差  $|\Delta T/T|$  的关系

Fig. 6 The relationship between binary significant digits  $B$  of luminosity data and relative error  $|\Delta T/T|$

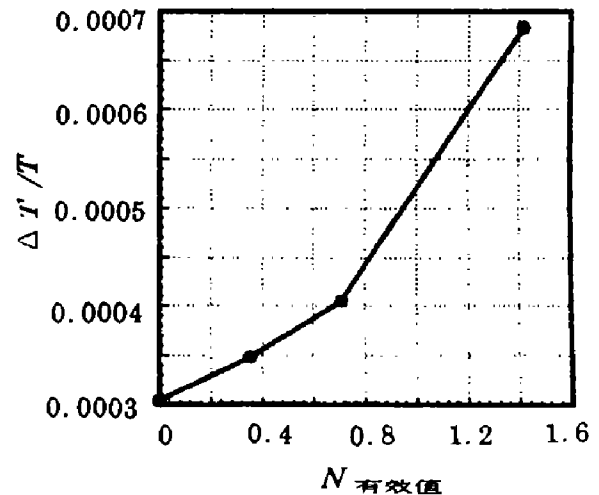


图 7 噪声  $N_{\text{有效值}}$  与测温相对误差  $|\Delta T/T|$  的关系  
Fig. 7 The relationship between noise  $N_{\text{rms}}$  and relative error  $|\Delta T/T|$

(6) 用 PIS-A 型瞬态光谱仪对不同电流电压下的钨卤素灯丝进行线性拟合测温, 得出灯丝温度  $T_C$  随供电功率  $W$  (W) 的线性上升关系曲线如图 8 所示. 图 8 中, 对供电稳压电源调压旋钮不变的每种状态测 10 次, 共测 4 组. 每组温度数据的波动, 除了光谱仪器的影响外, 尚有供电电源的波动和空气微动对灯温的影响. 4 组灯丝温度数据的最大变异系数为  $5.08 \times 10^{-4}$ , 灯丝温度  $T_C$  与供电功率  $W$  的线性相关系数为 0.989. 光度定标

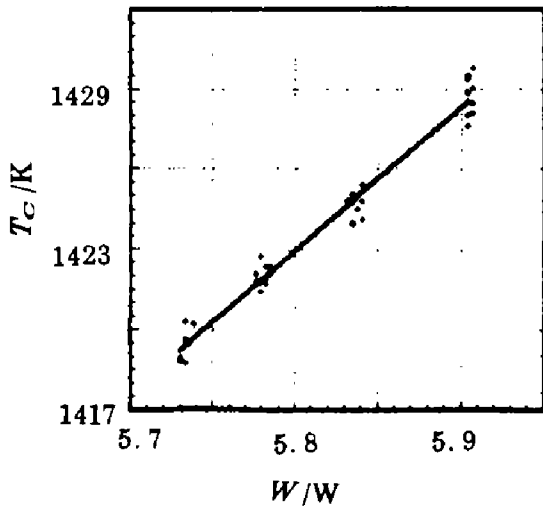


图 8 线性拟合法测得的钨卤素灯灯丝温度  $T_C$  与供电功率  $W$  的关系

Fig. 8 The relationship between the filament temperature  $T_C$  of tungsten-halogen lamp, measured by linear fit method, and the supplied power  $W$

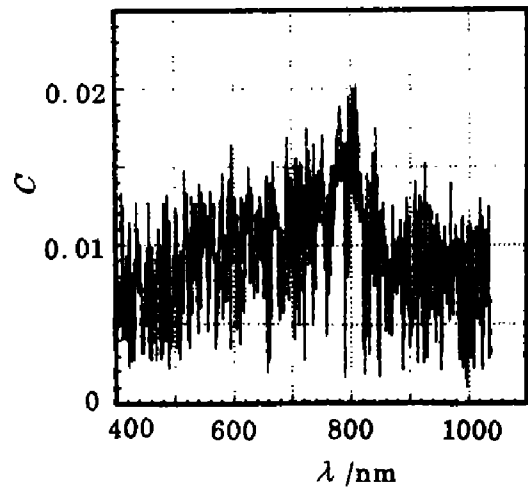


图 9 PIS-A 型光谱仪响应度的变异系数  $C$   
Fig. 9 Coefficient of variation of the response for the model PIS-A spectrometer

中, PIS-A 型光谱仪响应度的变异系数  $C$  的大小如图 9 所示, 由高斯误差传递定律<sup>[6]</sup>可计算出光谱仪响应度波动引起的测温相对误差为  $4.45 \times 10^{-4}$ . 从该计算结果和以上实测结果可见细分光谱高温测温线性拟合方案的测温相对稳定性是相当高的. 实测所得钨卤素灯的光谱辐射出射度  $M_L$  曲线如图 10 所示, 图 10 中点线为实测数据, 实线为拟合曲线. 由图 10 可见, 1000 nm 以上的部分实测数据偏离拟合曲线较大, 这可能是由于钨卤素灯在该波长段偏离灰体辐射特性较大所致, 故舍去 1000 nm 以上波长数据而算得以上灯丝温度, 否则所得温度将降低 5~10 K 不等,  $T_C$  与  $M$  线性关系将变差, 相关系数将变为 0.971.

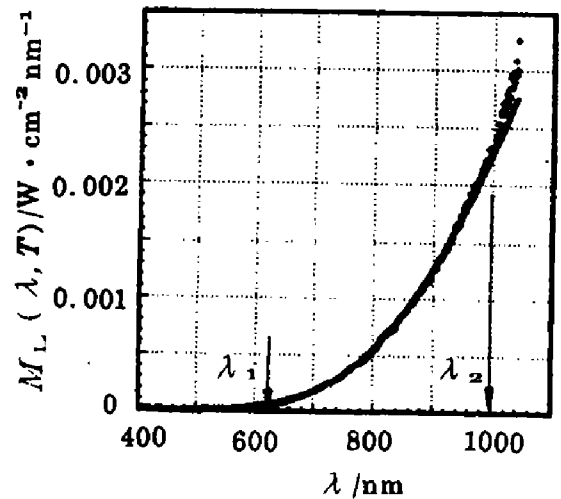


图 10 实测所得钨卤素灯的光谱辐射出射度  $M_L$

Fig. 10 The spectral radiant exitance  $M_L$  of tungsten-halogen lamp, measured by the PIS-A spectrometer

## 4 结语

(1) 线性拟合方案可适用于测算 1000~6000 K 的温度范围. 在光谱工作波长为 400~1038.75 nm 范围内, 当最大光度数据有效数字为 255, 且在无噪声情况下, 最大相对误差小于  $\pm 0.2\%$ , 平均正负相对误差在  $\pm 3.2 \times 10^{-4}$  以内. 在目标温度为 1000~2000 K 范围内, 不用系统误差校正即可得到最大相对误差小于 0.05% 的极高测温精度.

(2) 利用多项式公式校正可纠正维恩公式近似带来的系统测温误差; 合理限制线性拟合所取数据范围, 降低噪声, 提高模数转换位数, 可有效地提高测温精度.

(3) 线性拟合方案用几个公式各计算一次就可求得目标温度, 较运用迭代法的非线性普朗克公式拟合方案具有运行速度快的优点.

(4) 细分光谱测温是借助于目标光谱曲线形状近似灰体而不依赖于目标辐射的单色强度的测温技术, 所以它并不要求目标必须充满测温仪视场. 只要周围环境辐射对目标辐射的干扰不大或采取措施克服干扰影响, 就会得到较高的测温精度, 对钨卤素灯灯丝温度的实测结果证明了这一优点.

(5) 如果灰体目标充满测温仪视场, 用辐射细分光谱测温方案还可较精确地测得目标的发射率  $\varepsilon$ .

(6) 本研究所用光谱波段在可见光~近红外区, 受普遍存在的较强杂散可见光影响较大, 如果改用红外波段, 受可见光影响将大大减小.

(7) 目前细分光谱仪器价格相对双色测温仪高 3~5 倍, 但随着集成光学、多元列阵探测器和计算机技术的快速发展, 价格将很快降低, 该项测温技术将会得到迅速发展.

### 参考文献

- 1 张才根. 物理学报, 1982,31(9):1191~1197
- 2 张幼文. 红外系统工程, 上海: 上海科学技术出版社, 1982,28~29,495~498
- 3 张友山. 红外与毫米波学报, 1993,12(4):324~327
- 4 四川矿业学院数学教研组. 数学手册, 北京: 科学出版社, 1978,376~380
- 5 张才根, 张幼文. 物理学报, 1981,30(7):953~961
- 6 《物理技术手册》编写组. 物理技术手册—常用资料, 上海: 上海教育出版社, 1978,214

## A STUDY ON THE LINEAR FIT SCHEME OF FINE SPECTRA FOR MEASUREMENT OF HIGH TEMPERATURE

Wu Jiyou

(Department of Photoelectronics and Information Engineering,  
Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** According to the datum form of the PIS-A Instant Spectrometer, the spectral exitance of blackbody of 1000~6000 K was calculated with the Planck's formula to replace the value measured by the PIS-A Instant Spectrometer and some methods of reducing the error of the linear fit scheme were analyzed. This study indicates that a proper selection of upper and lower limits of the wavelengths in fitting operation, the increase of the signal-to-noise ratio and the digits of A/D conversion, and the compensation for the system error caused by the approximation of the Wien's formula to the Planck's formula, can effectively improve the accuracy of measurement.

**Key words** fine spectra, measurement of high temperature, linear fit, measurement error.