# 多光谱高温计有效波长标定方法研究

梁 美1,孙博君1,孙晓刚1\*,谢俊彦2,于晨涛1

- 1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001
- 2. 西安航天动力测控技术研究所,陕西 西安 710025

摘 要 针对光纤式多光谱高温计波长标定中由于光纤耦合导致信号太弱而无法获得有效波长的问题,基于普朗克定律,充分结合不同标定温度点的标定值的比值,提出了一种由温度标定数据来确定有效波长的方法。相比于传统的有效波长标定方法,新方法避免了耗时复杂的波长标定过程可以快速获取有效波长。分别采用仿真和实验两种手段来验证新方法的可行性和有效性。仿真结果表明所提出的新方法可行并且具有一定的抗随机误差能力,所得有效波长计算的真温值与实际值的相对误差小于 0.7%。实验结果表明提出的新方法能够得到各个通道的有效波长值,进一步验证了该方法的有效性。所提出的新方法也可应用于其他多光谱高温计,为多光谱高温计的研制和应用提供了理论基础。

关键词 标定;有效波长;多光谱高温计;真温

中图分类号: TK311 文献标识码: A **DOI**: 10.3964/j. issn. 1000-0593(2017)08-2352-04

#### 引言

在辐射测温领域中,多光谱高温计[1-3]是最重要的测量装置[4-5]之一。多光谱高温计获得被测目标的真温的整个流程如图 1 所示。多光谱高温计在使用之前的标定[6],是确保被测目标的真温能够准确获取的必要手段。多光谱高温计的标定由温度标定<sup>[3]</sup>和有效波长标定<sup>[7]</sup>组成。温度标定,即获得每个光谱通道的亮温与电压值之间的关系曲线的过程。有效波长标定,即采用棱镜分光式多光谱高温计进行测量时,由于光路中没有干涉滤光片,不能通过滤光片的透过率曲线获得光谱通道的有效波长,需要通过测量来获取相应光谱通道的有效波长的过程。目前,国内外研制的高温计装置进行

波长标定时主要采用 PWF 标定法<sup>[6-8]</sup>。但是,在实际标定的过程中存在以下问题:光纤式多光谱高温计在标定中,光纤耦合后所得到的输出信号太弱,无法获取有效波长;有效波长标定过程复杂,而且耗时费力。

针对有效波长获取相对困难和标定过程复杂,兼顾温度标定的必要性,以及对温度标定数据的总结分析,提出了一种多光谱高温计波长标定的新方法一直接通过温度标定数据来确定有效波长的方法。引入此方法后,高温计获得被测目标的真温的整个流程如图 2 所示。新方法是基于普朗克定律,结合不同标定温度点标定数据的比值提出的求解思想,并且通过仿真和实验两种手段,对新方法的有效性进行了分析验证。本方法避免了复杂耗时的波长标定过程,能够很好地获取高温计各个光谱通道的有效波长。新方法虽然是针对

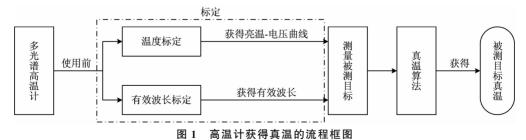


Fig. 1 Flow chart of the true temperature obtainment by pyrometer

收稿日期: 2016-06-23,修订日期: 2016-10-10

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ470767)资助

作者简介: 梁 美, 女, 1988 年生, 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院博士研究生 e-mail: liangmhit@gmail.com

\* 通讯联系人 e-mail: sxg@hit.edu.cn

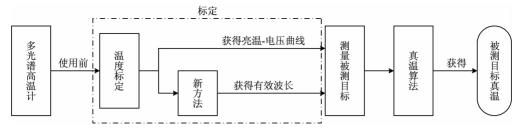


图 2 引入本文提出的新方法后的高温计获得真温的流程框图

Fig. 2 Flow chart of the true temperature obtainment by pyrometer after the introduction of the new method

光纤式高温计提出的,但也可以应用于其他的多光谱高温计,具有通用性,为多光谱高温计的研制和应用提供了理论基础。

#### 1 高温计原理

多光谱高温计通过处理多个波长下的被测目标的亮温值来获得被测目标的真温。如果一个多光谱高温计有n个光谱通道,由普朗克定律可知,其第i个通道的输出电压值 $V_i$ 可以表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} \varepsilon_i \lambda_i^{-5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda_i T)} - 1} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (1)

式(1)中, $A_{\lambda_i}$  是检定常数,与波长 $\lambda_i$  下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸及第一辐射常数有关; $\varepsilon_i$  是温度为T时的光谱发射率, $\varepsilon_2$  是第二辐射常数。由维恩公式得知,式(1)可近似为

$$V_i = A_{\lambda_i} \varepsilon_i \lambda_i^{-5} \frac{1}{e^{c_g/(\lambda_i T)}} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (2)

高温计通过温度标定后,由各个通道的输出值可以得出 亮温值。然后,根据有效波长值,采用真温算法就可以得到 被测目标的真温。本方法采用的真温算法是二次测量 法[9-10]。

#### 2 新方法的基本思路

采用的温度标定法是整百度点标定法[3,11],即在标定区间内的每个整百度点上获取一个 $(V_i,T)$ 数据对,从而获得电压和亮温关系曲线。在温度标定完成后,如何用所得到的数据来获得各个通道的有效波长是本研究的目的。

由式(2)得,对于不同的标定温度点、同一个光谱通道 的输出值的理论比值为

$$b_{j,k} = e^{\frac{c_2}{\lambda_i}(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_j})} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (3)

式(3)中 $b_{i,k}$ 表示在标定温度点 $T_i$ 和 $T_k$ 的输出值的比值。

然而,从实际温度标定数据分析可知,温度标定中所得输出值的实际比值  $b_{ij,k}$ 与理论比值并不相等,而是相差一个倍数。因而可以表示为

$$b_{rj, rk} = \beta_m \cdot b_{j, k} \tag{4}$$

式中 $\beta_m$ 代表系数,是一个正数。由式(3)和式(4)得

$$b_{rj, rk} = \beta_m e^{\frac{c_2}{\lambda_i} (\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_j})} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (5)

对于两组比值,则有

$$\begin{cases} b_{rj, n} = \beta_1 e^{\frac{c_2}{\lambda_i} (\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_j})} \\ b_{rj, n} = \beta_2 e^{\frac{c_2}{\lambda_i} (\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_j})} \end{cases} i = 1, 2, \dots, n$$
 (6)

式中  $T_l = T_k + \Delta$ 。在相同标定环境下, $\Delta$  越小则  $\beta_1$  和  $\beta_2$  越接近,因此  $\beta_2/\beta_1 \approx 1$ ,则根据式(6)可得

$$\lambda_i \approx \frac{c_2 \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_l}\right)}{\ln\left(\frac{b_{rj, t}}{b_{rj, t}}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (7)

根据式(7),结合不同标定温度点的标定值的比值,可以获 得高温计各个光谱通道的有效波长。

## 3 仿真与结论

#### 3.1 仿真实验

为了验证本方法的可行性,本节采用仿真数据进行理论仿真。根据高温计测量时所用的光谱范围,各个光谱通道的波长分别选取 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 及 1.1  $\mu$ m。考虑到温度标定所用的黑体炉的温度分段和标定数据的稳定性,选取  $T_k$ =1 400  $^{\circ}$ C,  $T_i$ =1 500  $^{\circ}$ C和  $T_j$ =1 700  $^{\circ}$ C三个整百度点的普朗克计算值作为标定值,如表 1 所示。因为在实际温度标定中,标定值不可避免的存在一定的误差。所以,在此标定值的基础上加入 $\pm 1\%$ 的随机误差之后,采用本方法进行仿真实验,所得计算波长值与实际波长值的相对误差如图 3 所示。

表 1 用于仿真的标定值

Table 1 Calibration values for simulation

标定	电压值/V					
温度/℃	1. 1 μm	1.0 μm	0.9 μm	0.8 μm	0.7 μm	0.6 μm
$T_k$	2.994	2.206	1.437	0.784	0.329	0.092
$T_l$	4.654	3.583	2.463	1.438	0.658	0.206
$T_{j}$	9.837	8.159	6.143	4.020	2. 131	0.812

表 1 中标定温度点  $T_k$  的标定值加入-1%的误差及  $T_k$  的标定值加入 1%的误差来计算有效波长值,得到图 3 中的最小误差曲线;同理,图 3 中的最大误差曲线是由  $T_k$  和  $T_k$  的标定值分别加入 1%和-1%的误差计算得来的。图 3 中的其他点表示四组表 1 中的标定值加入 $\pm 1\%$ 的随机误差之后,得到的有效波长值的相对误差情况。

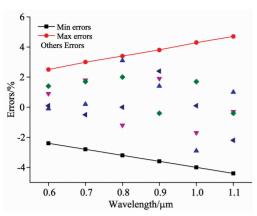


图 3 有效波长值的相对误差

Fig. 3 Relative errors of the effective wavelength values

为了研究所得有效波长的误差对真温计算结果的影响,进行了以下仿真实验。选取有六个光谱通道的高温计的有效波长值如表 2 所示,加入±5%的随机误差,采用二次测量法来计算真温值。所得计算真温值与实际真温值的相对误差如图 4 所示,给出了五组在表 2 的有效波长值基础上加入±5%的随机误差之后,所得真温计算结果的误差情况。

表 2 用于仿真的有效波长值

Table 2 Effective wavelength values for simulation (µm)

光谱	光谱	光谱	光谱	光谱	光谱
通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6
1.096	1.04	0.968	0.891	0.808	

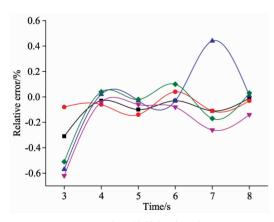


图 4 真温值的相对误差

Fig. 4 Relative errors of the true temperature values

#### 3.2 仿真结论

从图 3 可以看出,当温度标定值加入±1%的随机误差时,所得有效波长与实际值之间的相对误差随波长减小而减小:当波长为  $1.1~\mu m$  时误差范围最大,为 $-4.4\%\sim4.7\%$ ; 当波长为  $0.6~\mu m$  时误差范围最小,为 $-2.4\%\sim2.5\%$ 。由图 4 得,当有效波长加入±5%的随机误差时,所得真温与实际值之间的相对误差范围为 $-0.7\%\sim0.5\%$ 。所以我们可以得出这样的结论,本文所提出的由温度标定值来获得有效波

长的方法可行,并且所得波长值可以用来得到精度较好的真温值。

### 4 实验验证

为了进一步检验本方法的有效性,分别采用六波长高温 计的温度标定数据和某型号固体火箭发动机羽焰真温 3 s~8 s 时刻的测量数据,进行基于实测数据的实验验证。

为了保证所用实测数据是同一级放大的输出以及考虑到该高温计实际标定时所用黑体炉的温度分段范围,温度标定数据选取  $1500\sim1700$   $^{\circ}$  三个整百度点的高温计输出值,如表 3 所示。利用这些数据采用新方法计算有效波长,所得的计算结果与 PWF 标定法所得的有效波长结果的比较如表 4 所示。然后,根据固体火箭发动机羽焰真温的实测数据,采用二次测量法,分别用 PWF 标定法所得的有效波长值和新方法所得的有效波长值来计算真温值,所得比较结果如表 5 所示。

表 3 高温计的标定值
Table 3 Calibration values of the pyrometer

 标定			电压	值/V		
温度/℃	光谱	光谱	光谱	光谱	光谱	光谱
価度/し	通道 1	通道 2	通道3	通道 4	通道 5	通道6
1 500	0.728	0.991	0.543	0.278	0.243	0.081
1 600	1.110	1.555	0.887	0.472	0.435	0.155
1 700	1.621	2.330	1.377	0.760	0.733	0.278

表 4 两种方法所得有效波长值的比较 Table 4 Comparison of effective wavelengths

Table 4 Comparison of effective wavelengths obtained by two methods (μm)

PWF 标定法 所得波长值	新方法所得 波长值	绝对误差	相对误差 /%
1.028	1.027	-0.001	-0.1
0.962	0.962	0	0.0
0.882	0.883	0.001	0.1
0.812	0.819	0.007	0.9
0.746	0.744	-0.002	-0.3
0.681	0.668	-0.013	-1.9

表 5 两种方法所得真温值的比较

Table 5 Comparison of true temperatures obtained by two methods (K)

时刻/s	PWF 标定法 所得真温值	新方法所得 真温值	绝对误差
3	1 949.6	1 949.6	0
4	2 024.7	2 034.7	0
5	2 170.9	2 170.9	0
6	2 050.4	2 052.8	2.4
7	2 069.8	2 067.8	-2
8	2 099.9	2 098.9	-1

# 5 结 论

针对光纤式多光谱高温计实际波长标定中由于信号太弱而无法获取有效波长的问题,提出了一种新的有效波长的获取方法。根据理论分析,与 PWF 标定法相比, 新方法的优势在于去除了复杂耗时的波长标定过程, 直接由温度标定数据即可获得有效波长值。仿真结果显示, 温度标定值加入

±1%随机误差之后,新方法得到的波长值与实际值之间的相对误差小于 4.7%;有效波长值的相对误差在±5%以内时,对真温计算值的影响很小。因此,新方法可行并且具有一定的抗随机误差能力。基于实测数据的实验进一步验证了新方法的可行性和有效性。新方法也可应用于其他多光谱高温计,是一种通用、简单、有效且具有较大应用前景的波长值获取方法,为有效波长标定的研究开拓了新思路。

#### References

- [1] Coates P. Metrologia, 1981, 17: 103.
- [2] Khan M A, Allemand C, Eagar T W. Review of Scientific Instruments, 1991, 62: 392.
- [3] Wang Y L, Luan M S, Yu T Y. Infrared Technology, 2009, 7: 8.
- [4] Fu T, Liu J, Tang J, et al. Infrared Physics & Technology, 2014, 66: 49.
- [5] Fu T, Duan M, Liu J, et al. Infrared Physics & Technology 2014, 67: 590.
- [ 6 ] Zhang Fucai, Sun Xiaogang, Xing Jian. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1598.
- [7] Coppa P, Ruffino G, Spena A. High Temperatures. High Pressures, 1988, 20: 479.
- [8] Coppa P, Jinmin D, Ruffino G. International Journal of Thermophysics, 1993, 14: 599.
- [9] Sun XG, Yuan GB, Dai JM, et al. International Journal of Thermophysics, 2005, 26: 1255.
- [10] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min(孙晓刚, 戴景民). Journal of Infrared and Millineter Waves(红外与毫米波学报), 2003, 22: 141.
- [11] Hattori S. Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, 1982, 21: 1014.

# Study on Effective Wavelength Calibration Method of Multispectral Pyrometer

LIANG Mei<sup>1</sup>, SUN Bo-jun<sup>1</sup>, SUN Xiao-gang<sup>1</sup>\*, XIE Jun-yan<sup>2</sup>, YU Chen-tao<sup>1</sup>

- 1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
- 2. Xi'an Aerospace Power Institute of Measurement and Control Technology, Xi'an 710025, China

Abstract For the problem that the effective wavelength cannot be obtained because the signal is too weak due to fiber coupling during wavelength calibration of optical fiber multi-spectral pyrometer, a new effective wavelength determination method is proposed based on the data of temperature calibration. Based on the Planck's law, a new method for solving the wavelength is presented, combining with the calibration value ratios of different calibration temperature points. Compared with the traditional method of effective wavelength calibration, the new method proposed in this paper not only provides a new way to get the effective wavelength fast, but also avoids the complexity of the wavelength calibration process. Simulation and experiment were used in this paper to verify the feasibility and effectiveness of the new method. The simulation results showed that the new method which was feasible to get the effective wavelength had the anti-random error ability, and the relative error between the true temperature calculation value based on the effective wavelength and the actual value was less than 0.7%. The experimental results showed that the new method could get the effective wavelength of each channel, and further verify the effectiveness of the proposed method. The new method proposed in this paper can also be applied to other multi-spectral pyrometer, providing a theoretical basis for the development and application of the multi-spectral pyrometer.

Keywords Calibration; Effective wavelength; Multi-spectral pyrometer; True temperature

(Received Jun. 23, 2016; accepted Oct. 10, 2016)