

# 多光谱辐射外点罚函数反演算法的生物质锅炉火焰温度测量

邢 键<sup>1</sup>, 马 召<sup>2</sup>, 白 岩<sup>1\*</sup>

1. 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

2. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

**摘 要** 近年来, 为了减少对石化燃料的依赖和节能环保的强烈需求, 以稻壳、秸秆等可再生资源为燃料的生物质锅炉越来越受到业界的广泛重视。为了进一步提高生物质锅炉的燃烧效率, 优化炉膛结构, 需要实时监测火焰温度。传统的热电偶测温法不利于长时间高温测量, CCD 测温法又难以测量真实温度, 而多光谱辐射测温法具有响应速度快、无测量上限以及可以获得真实温度等优点, 是生物质锅炉火焰温度测量的最有力工具之一。多光谱辐射测温是通过测量待测物某点的多个光谱辐射强度信息, 通过普朗克公式反演获得真实温度。但是, 未知的光谱发射率是多光谱辐射测温反演过程的最大障碍。目前, 多采用事先假设一组发射率模型(发射率-波长或发射率-温度模型), 假设模型如果与实际情况相符, 则反演结果能够满足要求, 假设模型如果与实际情况不符, 则反演结果误差很大。能否在无需任何光谱发射率假设模型的情况下, 实现真温和光谱发射率的直接反演一直是多光谱辐射测温理论研究的热点和难点。为此, 提出外点罚函数约束优化算法, 将多光谱辐射测温反演问题转化为约束优化问题, 给出了罚函数的表达式和相关参数。与其他约束优化算法相比, 外点法的优势在于不受发射率初值的影响, 进一步提高了算法对不同材料发射率的适应度。基于微型光纤光谱仪, 搭建了稻壳粉生物质锅炉炉膛火焰温度测量装置, 通过实验室黑体炉标定后, 对稻壳粉生物质锅炉炉膛火焰从初燃到稳燃过程的温度进行了测量, 并与热电偶测量结果进行了对比。结果表明, 与热电偶测量结果相比, 多光谱辐射测温的最大绝对误差为 35.7 K, 最大相对误差为 3.2%。表明该测量装置及反演算法可实现生物质锅炉炉膛火焰燃烧温度的测量, 为后续生物质锅炉燃烧诊断及锅炉设计优化提供了基础。

**关键词** 多光谱辐射测温; 生物质锅炉火焰; 发射率; 外点罚函数

**中图分类号:** TK3    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3761-04

## 引 言

近年来, 为了应对节能环保的强烈需求和减小对石化燃料的依赖, 以稻壳、秸秆等可再生资源为燃料的生物质锅炉越来越受到业界的广泛重视<sup>[1-3]</sup>。

为了进一步提高燃烧效率, 优化燃烧工艺, 生物质燃烧过程需要实时测量温度; 目前通过热电偶等接触式测量方法, 即使增加铠装亦不能实现冷热交替的长期监测, 对于增压锅炉燃烧时的高温测量也难以实现。

多光谱辐射测温技术是非灰体高温测量的有力工具, 通过测量多个光谱通道的辐射强度数据反演获得待测目标表面的真实温度。目标表面未知的光谱发射率是数据反演过程中

的最大障碍, 传统的数据反演方法主要为固定发射率假设法<sup>[4-8]</sup>, 即根据经验事先假设一组发射率, 然后通过最小二乘法等直接求解, 当实际发射率与假设发射率存在偏差时, 反演精度不高。为了解决未知发射率影响的问题, 将多光谱真温反演问题转换为约束优化问题, 从而利用梯度投影或内点罚函数约束优化算法直接求解真温和发射率<sup>[9-10]</sup>, 上述两个算法受初始点选取影响较大, 为此提出将外点罚函数算法应用于多光谱辐射真温反演, 并搭建了多光谱辐射测温装置应用于稻壳粉生物质锅炉火焰温度的测量。

## 1 外点罚函数多光谱辐射测温原理

根据参考温度数学模型有

收稿日期: 2019-10-25, 修订日期: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61975028)资助

作者简介: 邢 键, 1979 年生, 东北林业大学信息与计算机工程学院副教授    e-mail: xingniat@sina.com

\* 通讯联系人    e-mail: 56008400@qq.com

$$\frac{V_i}{V'_i} = \varepsilon(\lambda_i, T) e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T} - \frac{C_2}{\lambda_i T'}} \quad (1)$$

式(1)中,  $V_i$  是目标在真实温度  $T$  下的输出电压,  $V'_i$  是第  $i$  个光谱通道在标定温度  $T'$  下的第  $i$  个通道的输出电压,  $\lambda_i$  是第  $i$  个通道的有效波长,  $\varepsilon(\lambda_i, T)$  是光谱发射率,  $C_2$  是第二热辐射常数。

通过式(1)可见,  $n$  个光谱通道构成  $n$  个方程, 但含有  $n+1$  个未知数, 即  $n$  个光谱发射率  $\varepsilon(\lambda_i, T)$ , 和 1 个待测真温  $T$ 。如果每个通道的光谱发射率已知, 则每个通道对应的真温  $T_i$  应相等, 因此可构建如式(2)约束条件, 即

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n [T_i - E(T_i)]^2 \rightarrow 0 \quad (2)$$

式(2)中,  $E(T_i)$  为所有通道反演温度的平均值。

因此, 多光谱辐射测温数据处理问题转化为如式(3)约束优化问题

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^n [T_i - E(T_i)]^2 \rightarrow 0 \\ 0 < \varepsilon(\lambda_i, T) < 1 \end{cases} \quad (3)$$

转化为

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^n [T_i - E(T_i)]^2 \rightarrow 0 \\ \varepsilon(\lambda_i, T) > 0 \\ -\varepsilon(\lambda_i, T) + 1 > 0 \end{cases} \quad (4)$$

设  $g_1(x) = \varepsilon(\lambda_i, T)$ ,  $g_2(x) = -\varepsilon(\lambda_i, T) + 1$ , 为此引入惩罚函数<sup>[1]</sup>

$$F(x) = f(x) + P \sum_{i=1}^2 \min[0, g_i(x)]^2 \quad (5)$$

用 Matlab 实现外点混合罚函数算法的函数名为: minConPF。调用函数

$[x, \min f] = \text{minConPF}(f, x_0, g, c_1, p, \text{var}, \text{eps})$  (6)  
式(6)中,  $x$  是自变量;  $\min f$  是目标函数的最小值;  $f$  是目标函数;  $x_0$  是初始点;  $g$  是约束函数;  $c_1$  为罚因子的初值;  $p$  为罚因子的比例系数;  $\text{var}$  是参数向量;  $\text{eps}$  是精度值(依据需求精度确定, 精度过高会影响反演效率, 为此适当选取  $\text{eps}$  值, 在精度和效率之间寻找一个平衡点)。通过多组发射率-温度仿真比较, 参数中罚因子初始值  $c_1$  和罚因子比例系数  $p$  为  $c_1 = 0.05$ ,  $p = 2$ 。

## 2 实验结果与讨论

多光谱测温装置由黑体炉、光学瞄准系统、微型光纤光谱仪(美国海洋光学 Flame-S)和计算机四部分组成, 光学瞄准系统通过调焦, 使目标辐射通光阑进入光纤, 只有聚焦在瞄准系统内的分划板上, 才表明目标辐射进入了光纤。系统经黑体炉(DY-HT3)标定(标定温度为 1 248 K)后进行现场测量, 装置如图 1 所示。

生物质锅炉选择的是哈尔滨森泰克再生能源技术开发有限公司生产的稻壳粉末生物质锅炉。锅炉燃料为生物质粉末颗粒, 燃料在炉内以喷雾化方式燃烧, 炉内配备森泰克专利燃烧室及防爆设施, S形燃烧室燃烧充分, 无死角, 炉膛容

积足够, 体积紧凑。燃烧室外壳尺寸为  $3.2 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ , 自动进料口高度为  $0.35 \sim 0.45 \text{ m}$ 。

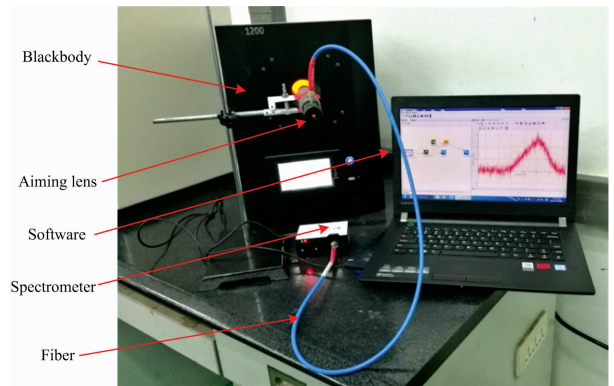


图 1 实验室装置及标定

Fig. 1 Equipment and calibration

表 1 各通道标定结果 ( $T' = 1\ 248 \text{ K}$ )

Table 1 Calibration ( $T' = 1\ 248 \text{ K}$ )

| 波长/nm | 相对光强     |
|-------|----------|
| 800   | 1 203.55 |
| 825   | 995.76   |
| 850   | 854.13   |
| 875   | 718.38   |
| 900   | 566.63   |
| 925   | 491.56   |
| 950   | 244.91   |
| 975   | 134.67   |

实验在锅炉点火初期(中午 12:14)至稳定燃烧状态(12:52)期间展开测量, 选择粉末生物质燃烧火焰集中区域作为被测目标。利用锅炉炉膛下部观察孔进行测试, 物镜调整聚焦在光纤探头处, 由光纤将待测点的热辐射传输至光谱仪, 通过软件记录各个光谱通道的相对光强值。测温单元和热电偶测温单元同时通过观察口获取被测火焰温度信息, 以热电偶检测结果为参考, 验证多光谱辐射测温结果的准确性。生物质锅炉火焰温度测量实验现场如图 2 所示, 不同时刻光谱图如图 3 所示。



图 2 现场实物图

Fig. 2 On-site testing

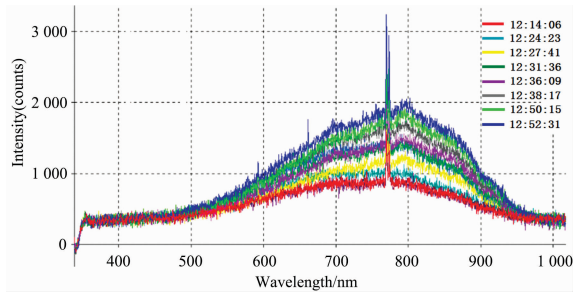


图 3 不同时刻的辐射光谱

Fig. 3 Radiation Spectra at different time

从图 3 可以看出,随着锅炉运行趋于稳定炉膛火焰光谱辐射强度逐渐增强,并且由于火焰是脉动的,光谱曲线存在很多“毛刺”,同时在 668 和 781 nm 处出现由炭黑粒子散射产生的发射谱线,不能作为红外热辐射光谱。因此为了实验结果的准确性,需要在连续谱中对待反演数据的波长范围进

行选择。依据普朗克辐射定律可发现黑体在同一波长不同温度的辐射能量比不同,可依据下式进行计算

$$\frac{V(\lambda_i, T_{2000})}{V(\lambda_i, T_{1000})} = \frac{\frac{c_2}{e^{\lambda_i T_{1000}} - 1}}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i T_{2000}} - 1}} \quad (7)$$

目前普通生物质燃烧设备的火焰温度小于 2 000 K,因此依据式(7)对温度为 1 000 和 2 000 K,波长范围为 0.5~1.0 μm 的辐射能量比值进行了计算,计算结果表明辐射能量的比值随着波长的增加逐渐减小,由维恩位移定律可得,

$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (8)$$

式(8)表明峰值波长 λ<sub>m</sub> 的变化和温度 T 成反比,当温度为 1 000 K 时,峰值波长为 2.9 μm,温度为 2 000 K 时,峰值波长为 1.4 μm,但维恩位移定律是针对绝对黑体得到的结论,被测目标的实际发射率小于 1,同时结合图 3 实测的炉膛火焰辐射光谱图,将波长范围选择在 0.8~1.0 μm。

采用 8 波长作为数据采集通道,各个时刻 8 个光谱通道的相对光强值如表 2 所示。

表 2 不同时刻各个波长对应的辐射强  
Table 2 Radiation intensity of each channel

| 波长/nm | 不同时刻各个波长对应的辐射相对强度值 |          |          |          |          |          |          |          |
|-------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|       | 12:14              | 12:24    | 12:27    | 12:31    | 12:36    | 12:38    | 12:50    | 12:52    |
| 800   | 900.26             | 1 010.79 | 1 196.85 | 1 386.54 | 1 483.92 | 1 702.40 | 1 822.67 | 1 959.55 |
| 825   | 775.42             | 877.06   | 1 079.51 | 1 181.75 | 1 278.79 | 1 461.30 | 1 557.38 | 1 703.96 |
| 850   | 713.41             | 812.92   | 993.64   | 1 069.94 | 1 202.19 | 1 319.76 | 1 451.02 | 1 521.73 |
| 875   | 658.79             | 762.64   | 840.20   | 1 012.68 | 1 039.34 | 1 195.21 | 1 286.08 | 1 398.89 |
| 900   | 508.82             | 652.75   | 725.98   | 783.34   | 780.26   | 848.36   | 906.94   | 985.67   |
| 925   | 434.70             | 446.44   | 546.88   | 627.35   | 626.50   | 660.50   | 732.84   | 771.69   |
| 950   | 376.48             | 380.02   | 404.90   | 445.94   | 433.40   | 430.76   | 419.23   | 468.97   |
| 975   | 327.40             | 320.32   | 355.33   | 359.31   | 376.77   | 344.30   | 344.17   | 346.12   |

基于表 1 和表 2,代入式(1)后,结合外点罚函数算法就可以得到火焰待测点的温度值,并与热电偶测量结果进行比较,结果如表 3 所示。

表 3 不同时刻温度测量结果  
Table 3 Measurement results

| 时间    | 热电偶/K | 多光谱/K   | 温度误差/K |
|-------|-------|---------|--------|
| 12:14 | 1 063 | 1 088.5 | 25.5   |
| 12:24 | 1 083 | 1 118.7 | 35.7   |
| 12:27 | 1 141 | 1 168.6 | 27.6   |
| 12:31 | 1 172 | 1 197.5 | 25.5   |
| 12:36 | 1 185 | 1 198.8 | 13.8   |
| 12:38 | 1 235 | 1 253.4 | 18.4   |
| 12:50 | 1 385 | 1 396.9 | 11.9   |
| 12:52 | 1 435 | 1 461.4 | 26.4   |

从表 3 可以看出,基于光纤光谱仪的多光谱辐射测温实验装置对于稻壳粉末生物质锅炉炉膛燃烧火焰的温度测量结果与热电偶测量结果相比,辐射测温结果高于热电偶测量结果,原因在于热电偶深入火焰内部,而辐射测温测量的是表面温度。与热电偶测量结果相比,多光谱测量值的最大绝对

误差为 35.7 K,最大相对误差为 3.2%。实验结果表明,该测量装置及反演算法可实现生物质锅炉炉膛火焰燃烧温度的测量,并可通过调整公式(6)中的 eps 精度值进一步提高反演精度,但也会牺牲计算效率。

### 3 结 论

为了验证将多光谱辐射测温方法应用于生物质火焰温度在线测量的可行性,搭建了基于光纤光谱仪的多光谱辐射测温装置。该装置通过望远镜及十字形小孔光阑结合光纤探头,将待测点的热辐射引入光纤光谱仪。利用该装置对稻壳粉末生物质锅炉不同工况下的炉膛火焰光谱辐射信息进行测量,获取黑体炉在参考温度处的辐射信息,在无需考虑发射率的情况下,采用无需考虑初值位置的外点罚函数法进行温度反演,并与热电偶测量结果进行比较,验证本方法的准确性和有效性。实验结果表明,与热电偶测量结果相比,多光谱测量值的最大绝对误差为 35.7 K,最大相对误差 3.2%,亦可通过调整 eps 参数进一步提高精度。实验验证了外点罚函数算法的可行性,为后续生物质锅炉设计的优化提供了研究基础。

## References

- [ 1 ] Moguel F O, Szuhanski J, Clements A G, et al. *Fuel Processing Technology*, 2018, 173: 243.
- [ 2 ] Fernandez-Anez N, Slatter D J F, Saeed M A, et al. *Fuel*, 2018, 223: 451.
- [ 3 ] Wen C D, Chai T Y. *Appl. Therm. Eng.*, 2011, 31(14): 2414.
- [ 4 ] Fu T, Liu J, Zong A. *Appl. Opt.*, 2014, 53(29): 6830.
- [ 5 ] Zhang G, Liu Z, Xu Z M, et al. *Appl. Phy B*, 2016, 122(1): 3.
- [ 6 ] Dong Y, Puneet P, Tritt T M, et al. *J. Mater. Sci.*, 2015, 50(1): 34.
- [ 7 ] Herve P, Cedelle J, Negreanu I. *Infrared Phys. Technol.*, 2012, 55(1): 1.
- [ 8 ] WANG Yong, DAI Jing-min(王 勇, 戴景民). *Fuc. Mater. (功能材料)*, 2015, 46(B06): 5.
- [ 9 ] Sun X G, Yuan G B, Dai J M, et al. *Int. J. Thermophys.*, 2005, 26(4): 1255.
- [10] Liang J, Dai L, Xing J, et al. *Optics Exp.*, 2018, 26(20): 25706.
- [11] Kokurin M Y. *J. Inver. Ill-posed Prob.*, 2016, 24(3): 323.

# Multi Spectral Radiation External Penalty Function Inversion Algorithm for Flame Temperature Measurement of Biomass Boiler

XING Jian<sup>1</sup>, MA Zhao<sup>2</sup>, BAI Yan<sup>1\*</sup>

1. College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract** In recent years, in order to reduce the dependence on fossil fuels and the strong demand for energy conservation and environmental protection, biomass boilers with rice husk, straw and other renewable resources as fuel have attracted more and more attention in the industry. In order to further improve the combustion efficiency of the biomass boiler and optimize the furnace structure, it is necessary to monitor the flame temperature real-time. The traditional thermocouple temperature measurement method is not conducive to long-term high temperature measurement, and the CCD temperature measurement method is difficult to measure the real temperature, while the multispectral radiation temperature measurement method has the advantages of fast response, no upper limit of measurement and can obtain the real temperature, which is one of the most powerful tools for measuring the flame temperature of a biomass boiler. Multispectral radiation thermometry is to obtain the real temperature by measuring the spectral radiation intensity information of a certain point of the object to be measured and inverting it with Planck formula. However, the unknown spectral emissivity is the biggest obstacle in the inversion process of multi-spectral radiation thermometry. At present, a group of emissivity models (emissivity wavelength or emissivity temperature models) are usually assumed in advance. If the assumed models are consistent with the actual situation, the inversion results can meet the requirements. If the assumed models are inconsistent with the actual situation, the inversion results have a large error. Whether the direct inversion of true and moderate spectral emissivity can be realized without any spectral emissivity hypothesis model is always a hot and difficult topic in the theoretical research of multispectral radiation thermometry. For this reason, a constrained optimization algorithm of penalty function is proposed, which transforms the inversion problem of multi spectral radiation temperature measurement into a constrained optimization problem. Because the outer point method is adopted, it is not affected by the initial value of emissivity, which further improves the adaptability of the algorithm to the emissivity of different materials. Based on the flame-s model optical fiber spectrometer produced by American ocean optics, a flame temperature measuring device of rice husk biomass boiler furnace was built. After the calibration of blackbody furnace in the laboratory, the temperature of the furnace flame of rice husk biomass boiler from initial combustion to stable combustion was measured, and the results were compared with those of thermocouple. The results show that the maximum absolute error is 35.7 K, and the maximum relative error is 3.2% compared with the thermocouple. The results show that the measurement device and the inversion algorithm can realize the measurement of the combustion temperature in the furnace of the biomass boiler, which provides the preliminary research basis for the subsequent combustion diagnosis and boiler design optimization of the biomass boiler.

**Keywords** Multi-wavelength radiation thermometry; Biomass boiler flame; Emissivity; External penalty function

\* Corresponding author

(Received Oct. 25, 2019; accepted Mar. 11, 2020)