

红外多谱线二维辐射温度场重建算法的研究

张福才^{1,2}, 孙晓刚¹, 邢 键³, 安建民⁴

- (1. 哈尔滨工业大学 自动检测与过程控制系统研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 黑龙江科技大学 电子与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;
3. 哈尔滨工程大学 计算机学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 空军驻京津地区军事代表室, 天津 300308)

摘要: 对于 2 000 K 以上的温度场, 采用热像仪对温度场进行检测时, 由于热像仪存在饱和问题, 所以采用热像仪重建温度场这种测量的方法已不再适用。利用多组光学探头通过光纤远传, 实现多光谱多通道数据的测量。在无需预先假设发射率与波长之间的模型关系基础上, 通过迭代算法获得表面某些点的真温。通过布置成十字测温结构的多光谱方法实现涡轮增压锅炉多点温度的测量, 构建了整个高温温度场的温度分布。结果表明: 该方法用来测量高炉温度场分布可行、预测误差较小, 可以为高温温度场的分析诊断提供参考。

关键词: 温度场; 真温; 多光谱; 十字测温

中图分类号: TH865 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0704003

Research on reconstruction algorithm of two dimensional radiation temperature field using infrared multi-spectral line

Zhang Fucui^{1,2}, Sun Xiaogang¹, Xing Jian³, An Jianmin⁴

- (1. Institute for Automatic Detection and Process Control System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;
3. School of Computing, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
4. Military Representative Office of Air Force in Beijing and Tianjin, Tianjin 300308)

Abstract: For the above 2 000 K temperature field, due to the saturation problem of thermal imager, the reconstruction of thermal imager temperature field of this measurement method is no longer applicable. Using a plurality of optical probe and through the optical fiber transmission, data measurements were realized under the multi-channels and multi-spectral. On the basis of the proposed model without the assumption of the relationship between the emissivity and wavelength, the true temperature of the surface was obtained by the iterative algorithm. By arranging a cross temperature structure of the multi spectral method to the turbocharged boiler, multi-points temperature measurement were achieved and the

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-12-10

基金项目: 2014 年国家重大科学仪器设备开发专项项目(2013YQ470767); 国家自然科学基金(61405045);
黑龙江省教育厅科技项目(12521487)

作者简介: 张福才(1978-), 男, 博士生, 主要从事红外温度场的重建理论与方法的研究。Email: 510132156@qq.com

导师简介: 孙晓刚(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光谱辐射理论与测量方面的研究。Email: qingtengzfc@yeah.net

temperature distribution of the temperature field was constructed. The results show the method can be used to measure the temperature field distribution of the turbocharged boiler and the prediction error is small, which can be used as a reference for the analysis and diagnosis of high temperature field.

Key words: temperature field; true temperature; multi-spectral; cross temperature

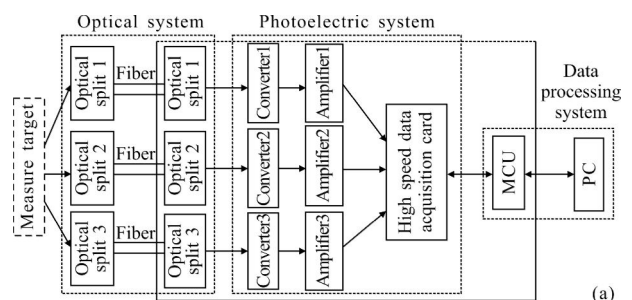
0 引言

近年来,多光谱光学高温计已经成为高温辐射领域中重要的测量工具^[1]。在众多的测量光谱发射率和真温的方法中,多光谱高温计仍然是其中一种重要的手段^[2]。国内外多位学者经过若干年的发展,在多光谱光学高温计取得了一定的成果。Hopkins 与 Mark F. 探讨了一种四色红外高温计,完成了武器系统中的套管材料的动态温度变化特性测试,通过实验,新的光谱仪能够准确地计算出温度和发射率^[3]。符泰然、程晓舫等人将光谱仪和 InGaAs 近红外光谱仪结合形成了紫外-可见-近红外多光谱光纤高温计,波长的选择范围更宽,选择相邻波段时,发射率近似认为与波长呈线性关系^[4-5]。NG 和弗莱里克探索了热障涂层的光谱的特征,进而多光谱高温计用于航天器的温度测量^[6]。Wen 和 Mudwar 预测了基于光谱发射率与波长之间的关系假设的精度规律并在 600~800 K 的温度范围内采用红外光谱进行了相关实验检验^[7]。孙晓刚等人提出了一种多光谱高温计无源温区的标定方法,此方法建立了一种基于幂函数的温度/电压模型,在此基础上实现对无源温区的标定^[8]。2005 年以来,哈尔滨工业大学孙晓刚教授提出了应用 BP 神经网络方法并且与改进的遗传算法一起弥补了 BP 神经网络多光谱处理方法中存在的缺陷,解决了工程材料多光谱真温测量方面的问题^[9]。Svet 等人研制出了一种新的三波长光谱比色高温计并用于测量真温以降低有效的波长数量,基于设计提出了一种相对应的测量算法,该算法可完成对金属真温的测量^[10]。哈尔滨工业大学自动检测与过程控制系统研究所经过多年研究,多光谱辐射表面温度场重建算法研究多光谱辐射高温计被测面积的最小尺寸可以达到 1 mm²,可以看作是点温,同时,根据需要可利用多组光学探头通过光纤远传实现,同时获得多点的温度值。另外,自 20 世纪以来,西方发达国家研制的各型增压锅炉在大型船只

上得到了广泛的应用。某些船只只需要具有优异的机动性能,要求其主增压锅炉频繁地增减负荷,甚至是迅速地启动或停炉;相应地,投入炉膛的燃油量频繁地变化,由于助燃空气由涡轮增压器压缩增压,其物性参数随着锅炉运行工况的改变也存在着波动;此外,船只的工作条件恶劣,在风浪的作用下存在着晃动等因素的综合作用使炉内油料的燃烧、烟气与管壁的传热等情况相较于固定式锅炉更为复杂;炉膛内燃油的燃烧率和放热量、火焰的体积、火焰在炉膛内的位置等不停地脉动变化。传统方法主要依靠操作人员通过锅炉上的观察窗口,用肉眼进行观察,依据经验判断对运行做出相应的调整,尚缺少效果好且可靠性高的监测和控制技术,自动化程度低,对操作人员的要求也相对较高。为此,实现船用增压锅炉燃烧情况的计算机实时监测,得到炉内火焰的温度和状态信息,对于锅炉的运行调整和燃烧优化等都具有重要意义,也是一个亟待解决的问题。文中将多光谱技术与十字测温方法相结合提出了基于多光谱辐射表面温度场重建算法,该方法能有效用于检测炉内温度变化,并为高炉优化控制和炉况诊断等提供准确的操作指导,进而保证高炉安全平稳运行,实现高炉优质、高效、低耗,具有良好的经济效益和社会效益。

1 多光谱测温的基本原理

温度测量系统有 6 个光谱通道,选择的波长为 0.4 μm、0.5 μm、0.6 μm、0.7 μm、0.8 μm、0.9 μm 和 1.1 μm,其结构如图 1 所示。



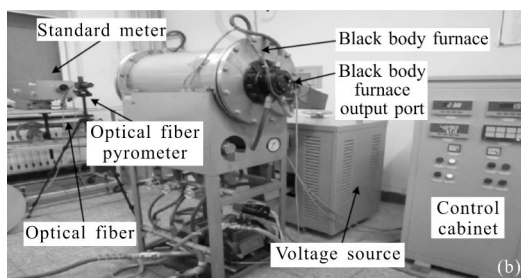


图 1 多光谱测温的结构

Fig.1 Structure of multi-spectral temperature measurement

对于第 i 个通道的输出信号的电压值 V_i 可以表示为:

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot C_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: A_{λ_i} 为只与波长有关的仪器常数, 它与该波长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量有关; $\varepsilon(\lambda_i, T)$ 为温度 T 时的目标光谱发射率; λ_i 为相应通道的波长; C_1 为第一辐射常数; C_2 为第二辐射常数。对公式(1)两端分别取对数并整理, 得:

$$\ln \varepsilon(\lambda_i, T) = \ln V_i + 5 \ln \lambda_i - \ln(A_{\lambda_i} \cdot C_1) + C_2 / \lambda \cdot T \quad (2)$$

为便于计算, 令 $K = \ln V_i + 5 \ln \lambda_i - \ln(A_{\lambda_i} \cdot C_1)$, 则公式(2)变为:

$$\ln \varepsilon(\lambda_i, T) = K + C_2 / \lambda \cdot T \quad (3)$$

根据相关的辐射测温理论, 假设发射率的对数与波长呈下列关系, $\ln \varepsilon(\lambda_i, T) = a_0 + a_1 \cdot \lambda_i + a_2 \cdot \lambda_i^2 + \dots + a_m \cdot \lambda_i^m$ 代入公式(3)并在两端乘以 λ 得:

$$K \cdot \lambda = -\frac{C_2}{T} + a_0 \cdot \lambda + a_1 \cdot \lambda^2 + \dots + a_m \cdot \lambda^{m+1} \quad (4)$$

将公式(4)表示成以 $(C_2/T, a_i)$ 为系数的 λ 的 $m+2$ 阶的函数。再用回归算法求得这 $m+2$ 个系数, 便可拟合出发射率函数和动态的温度, 这就是多光谱测温法的基本原理。

2 十字测温的表面温度场重建原理

十字测温重建温度场按照图 2 所示的技术路线进行。以 9 点 2 环十字测温为例, 在要重建的区域内通过十字布局的多光谱辐射测温探头同时测量 9 个距离较近的点温。进行十字测温插值数据处理时将同一半径方向的 4 个温度点数据作为同一组数据, 中心点为一组数据, 将 9 个温度点数据分成 3 组, 即

中心点 9 号为第 1 组, 1、2、3、4 为第 2 组, 5、6、7、8 为第 3 组。由于温度点距离较近, 可采用空间平均对每组数据进行处理, 再对每组处理后的数据进行牛顿插值, 即可获得以中心点 9 号位为中心, 沿半径 r 处的温度变化图, 这里只是示意性的说明, 只是用来说明原理, 不等同与实际测量的温度点。

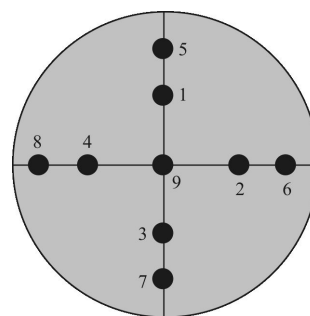


图 2 十字测温原理示意图

Fig.2 Principle of cross temperature measurement

3 实验验证

3.1 测量点的温度分布

结合上面的理论推导出其余未知点的温度值。新计算出的温度值又可以作为已知的温度值参与到后续的插值计算中去, 由此循环下去即可计算出所有未知的温度值, 构建的温度场的分布如图 3 和 4 所示, 图 3 是温度点的平面分布图, 需要说明一点, 这里实际采用的是双十字测量点布局结构。采用双十字的测温结构, 同一个未知测温度点采用两组数据进行验证, 可以提高数据的可靠性与准确性。

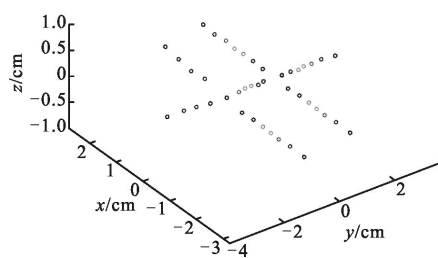


图 3 温度测量点分布图

Fig.3 Distribution of temperature measurement points

3.2 多光谱真温点数量与温度场分布的关系

图 4 通过插值方法探讨了多光谱真温点数量与温度场分布的关系, 其中图 4(a) 为 45 个温度点, 与图 4(b) 为 35 个温度点时反映的温度场分布格局非

常类似, 温度最高的区域位于高炉中部偏左区域。图 4(c) 为 25 个样点的温度场空间布局, 虽然有一定的平滑效应, 说明利用 25 个温度点进行温度场的空间预测, 依然能较好地反映实际的温度场空间分布。图 4(d) 为 15 个温度点, 图 4(c) 为 10 个温度点, 这两幅图则无法反映上述分布格局, 特别是一些细节特征更无法准确表达。因此, 从温度场空间分布表征的角度出发, 25 个温度点也是温度场评价空间预测时比较合适的温度点数量。总体来说, 随着样点数量的减少, 温度场预测结果越来越平滑, 对细节的反映能力越来越弱。

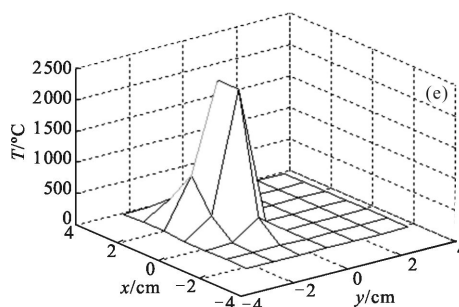
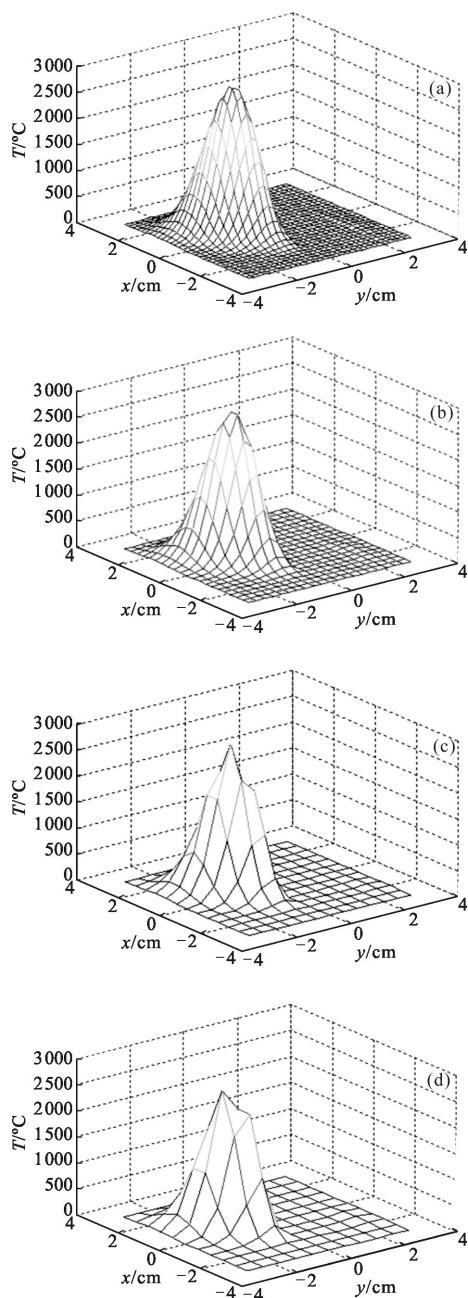


图 4 不同数量温度点预测的温度分布

Fig. 4 Prediction of temperature distribution at different temperature points

3.3 不确定度分析

因为存在有源温区和无源温区的两种标定不确定度, 所以当被测温度范围在 900~3 000 °C 时, 其不确定度为 1.07%^[11], 在 1 000 °C 以下热电偶的不确定度为 0.25%^[12], 双十字重建方法的不确定度小于 2.1%, 由此合成的不确定度为:

$$\sqrt{(1.07\%)^2 + (0.25\%)^2 + (2.21\%)^2} = 2.47\%$$

4 结论

在对多波长高温计数据处理时提出一种新的迭代算法, 综上所述, 得出以下结论: (1) 从理论分析可知, 该算法主要特点在于无需预先假设的光谱发射率与波长的关系即可完成目标点的真实温度的计算。由实际应用可知, 只要温度初值与真值误差在 ±200 K 以内, 都可以较好地计算目标点的真温; (2) 从迭代算法可以看到: 45、35 以及 25 个温度点子集都可以较可靠地反映温度场空间变化情况, 而 15 个和 10 个样本子集则无法保证可靠性。 (3) 由于温度点的温度测量和数据迭代算法需要时间, 所以该方法不适于实时测量的场合, 也就是说该方法只适合于稳态温度场的测量中。

参考文献:

[1] Herve P, Cedelle J, Negreanu I. Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(1): 1-10.
 [2] Su Weiyue, Wu Ruihuan. Research progress of multi-wavelength Erbium-doped fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014(9): 41-46. (in Chinese)
 苏炜跃, 吴锐欢. 多波长掺铒光纤激光器的研究进展 [J].

- 激光与光电子学进展, 2014(9): 41-46.
- [3] Hopkins, Mark F. Multi-spectral measurement using a novel high-speed imaging pyrometer [J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1997: 91-98.
- [4] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Zhong Maohua, et al. Analyses of spectral emissivity in radiation temperature measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28 (1): 1-5. (in Chinese)
符泰然, 程晓舫, 钟茂华, 等. 辐射测温中光谱发射率的表征描述[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 1-5.
- [5] Fu Tairan, Tan Peng, Pang Chuanhe, et al. Fast fiber-optic multi-wavelength pyrometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 064902-1-064902-8.
- [6] Ng D, Franlick G. Use of a multi-wavelength pyrometer in several elevated temperature aerospace applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001(72): 1522-1530.
- [7] Wen Changda, Mudawar Issam. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multi-spectral radiation thermometry (MRT) emissivity models [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48 (7): 1316-1329.
- [8] Sun Xiaogang, Sun Kun, Dai Jingmin. Research on the non-source temperature calibration of multi-spectral pyrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 32(1): 273-277. (in Chinese)
孙晓刚, 孙崐, 戴景民. 一种多光谱高温计无源温区的标定方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 32 (1): 273-277.
- [9] Sun Xiaogang, Yuan Guibin, Dai Jingmin. Multi-spectral thermometry based on GA-BP algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(1): 273-277. (in Chinese)
孙晓刚, 原桂彬, 戴景民. 基于遗传神经网络的多光谱辐射测温法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 273-277.
- [10] Svet D Ya, Sergeev S S. A triple-wavelength pyrometer that measures true temperature [J]. *Measurement Techniques*, 2012: 1-3.
- [11] Sun Kun. Research on technique of explosion flame true temperature measurement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
孙崐. 爆炸火焰真温测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [12] Liu Xudong. Uncertainty evaluation of the measurement results from Pt-Rh-10 thermocouple [J]. *Experiment Science and Technology*, 2015, 13(3): 29-31. (in Chinese)
刘旭栋. 铂铑 10-铂热电偶测量结果的不确定度评定 [J]. 实验科学与技术, 2015, 13(3): 29-31.