

团体标准

T/CBWA 00XX-202X

基于光谱检测的温度测量技术规范

Technical specification for temperature measurement based on spectral
detection

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国锅炉及锅炉水处理协会 发布

目 次

前言III

1 范围4

2 规范性引用文件4

3 术语和定义4

4 基本原理5

5 光谱检测系统6

6 辐射标定7

7 光谱发射率建模7

8 基于光谱检测的温度计算步骤8

附录 A（规范性）光谱检测系统辐射标定算法8

附录 B（资料性）辐射对象模型构建及光谱发射率检测方法10

附录 C（资料性）推荐的发射率模型12

参考文献13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国锅炉与锅炉水处理协会提出并归口。

本文件起草单位：中国矿业大学、华中科技大学、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、中国特种设备监测研究院、西安热工院有限公司、华北电力大学、长春光学精密机械与物理研究所、武汉大学、西北工业大学、清华大学、福建省福能龙安热电有限公司、江苏省智慧能源技术及装备工程中心、江苏汉光智能科技有限公司

本文件主要起草人：周怀春、姜春、孙亦鹏、张向宇、余波、刘峰、刘成永、李军、李框宇、郑树、黄志峰、梁静秋、赵莹泽、陈玉民、刘洋、王鑫雨、吴剑恒、杨昊、刘冰、朱韶华、隋然

本文件为首次发布。

基于光谱检测的温度测量技术规范

1 范围

本文件规定了基于光谱检测的高温工业炉温度测量技术所需的基本硬件与软件要求，光谱检测系统辐射标定的标准步骤，不同类型辐射对象的光谱发射率建模方法，光谱检测的温度测量技术的标准步骤，以及光谱检测的温度测量技术精度评价等方面技术要求。

本文件适用于基于辐射光谱检测的高温工业炉温度测量技术。炉内温度在 800-2000 °C 范围内的工业炉可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T16839.1 热电偶 第 1 部分：分度表

GB/T16839.2 热电偶 第 2 部分：允差

JB/T9238 工业热电偶技术条件

GB/T 13277.1 压缩空气 第 1 部分：污染物净化等级

GB/T 1576 工业锅炉水质

GB/T 12145 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量

GB/T10184 电站锅炉性能试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

热辐射 **thermal radiation**

物体由于具有温度而辐射电磁波的现象。

3.2

辐射对象 **radiation object**

待检测的热辐射目标

3.3

光谱检测系统 **spectral detection system**

获得物体光谱信息的器件所构成的整体。

3.4

连续光谱 **continuous spectrum**

辐射强度随波长变化呈连续分布的光谱。

3.5

光谱信号 **spectral signal**

光谱检测系统所采集的光谱能量信息。

3.6

光谱发射率模型 **spectral emissivity model**

光谱发射率与波长之间的函数关系。

3.7

信号分析处理系统 **signal analysis and processing system**

处理光谱信号及显示检测结果所需的硬件总成。

3.8

波长重复性 **wavelength repeatability**

对同一辐射源多次测量时峰值波长测量结果的一致程度，通常取峰值波长测量结果的极值作为衡量波长重复性的指标。

3.9

数据位深 **data bit depth**

每个波长下的光谱信号占用二进制位的位数。

3.10

光纤损耗 **optical fiber loss**

指光纤在单位长度上的衰减，单位为 dB/km。

3.11

碳烟火焰 **soot flame**

燃烧产物中固态组分仅含有碳烟的火焰。

3.12

辐射对象模型 **radiation object model**

与辐射对象具有相似辐射特性的模型，用于建立辐射对象的发射率模型

4 基本原理

物体由于热的原因不断向外界辐射电磁波，这些电磁波中蕴含着关于该物体温度以及光谱发射率的具体信息。使用经由辐射标定的光谱检测系统采集目标物体的热辐射光谱，并将其发射率假设为波长的函数，从而构建目标物体温度及其发射率模型参数的方程组，最终实现目标物体温度与发射率的同步求解。

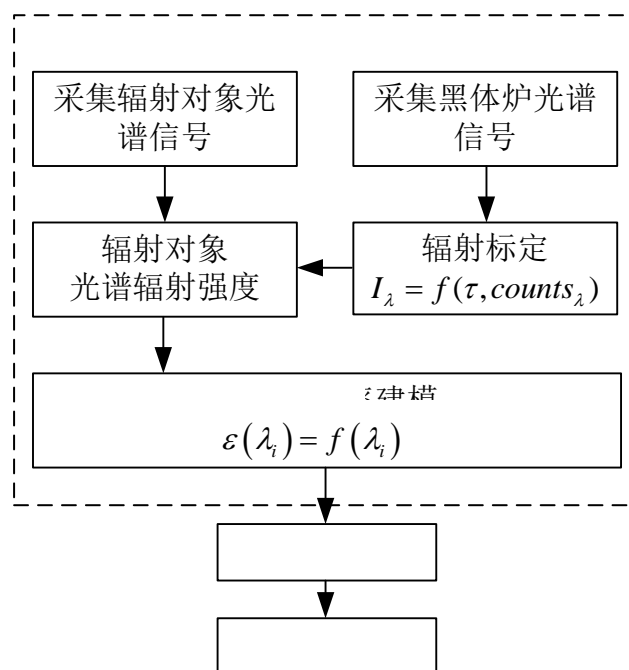


图 1 光谱测温流程图

5 光谱检测系统

光谱检测系统包括硬件和软件两部分，应选用技术成熟可靠、稳定性好的产品。光谱检测系统工作稳定，抗干扰能力强，连续工作时长应不低于设备检修周期，且工作时间范围内数据采集不间断。

5.1 硬件组成

5.1.1 光谱检测系统的硬件包括准直镜、光纤、光纤光谱仪、传输线缆、信号分析处理系统以及冷却系统。

a) 光纤光谱仪有效工作波长应包含 400-700 nm，光谱分辨率应不低于 20 nm，波长示值误差不超过 ± 2 nm，波长重复性应不超过 0.5 nm，数据位深应不低于 8 bit；

b) 光纤单点损耗不应超过 0.1 dB/km，准直镜刻度、刻字清晰，无划痕、碰伤；

c) 光纤前端应位于准直镜的一倍后焦距处，两者结合后的视场角应不高于 2° ；

d) 光纤、准直镜的有效工作波长应覆盖光纤光谱仪的工作波长；

e) 传输线缆宜采用数字信号传输，可采用光纤或网线，数据传输协议宜采用 IEEE 802.3 1000baseT，接口标准宜采用基于千兆以太网通信协议开发的 GigE Vision。当信号传输距离大于 80 米时，应选择采用光纤；

f) 信号分析处理系统所用处理器的运行频率不小于 80MHz、内存不低于 16GB、硬盘容量根据存储数据容量进行选择；

g) 光谱检测系统所处环境温度高于工作温度时需要配备冷却系统；

h) 冷却系统冷却介质可选用风冷或水冷。采用风冷时冷却风应清洁、干燥，冷却风颗粒物等级符合标准 GB/T 13277.1-2023 固体颗粒等级 0-5 级标准、湿度等级符合标准 GB/T 13277.1-2023 湿度等级 0-5 级标准，采用水冷时冷却水应采用清洁的软水或除盐水，水质满足标准 GB/T 1576-2018 中规定的采用锅外水处理的自然循环蒸汽锅炉和汽水两用锅炉水质额定蒸汽压力大于 1MPa 的给水水质要求或满足标准 GB/T 12145-2016 规定锅炉给水质量最低标准要求。

5.2 软件组成

5.2.1 软件包括连续光谱采集软件和温度计算软件。

5.2.2 连续光谱采集软件应具有积分时间调节、光谱采集频率控制、扣除背景光谱等功能。

5.2.3 基于辐射光谱的温度计算软件应满足计算过程快速、准确，响应时间应小于 1 秒，计算温度相对偏差应不大于 5%。

5.2.4 积分时间可以自动或手动调整，应保证光谱信号强度峰值处于数据位深的 70%-95% 之间。

6 辐射标定

6.1 技术要求

6.1.1 使用黑体炉对光谱检测系统进行辐射强度标定，应对光谱检测系统的每个测量通道分别构建标定函数。

6.1.2 构建标定函数时自变量为积分时间与光谱信号强度，因变量为光谱辐射强度。

6.1.3 黑体炉发射率大于 0.99。

6.1.4 标定过程中光谱检测系统中的硬件需处于正常运行的状态。

6.1.5 标定过程中的积分时间和光谱信号强度应覆盖测量过程中的积分时间和光谱信号强度。

6.1.6 标定过程中黑体炉温度设定的间隔应不超过 20 °C，黑体炉的温度设定范围应确保黑体炉的光谱信号强度覆盖被检测对象的光谱信号辐射强度。

6.1.7 标定过程中准直镜正对黑体炉炉膛中心。

6.2 辐射标定顺序

6.2.1 启动黑体炉。

6.2.2 黑体炉温度升高到标定温度后，调节光谱检测系统的积分时间，采集不同积分时间下的黑体炉光谱信号强度，记录标定温度和积分时间。

6.2.3 调节黑体炉温度，重复上一步。

6.2.4 黑体炉温度升高到标定温度上限后，停止采集黑体炉光谱，标定过程结束。

6.2.5 根据黑体炉温度计算黑体光谱辐射强度，拟合光谱信号强度、积分时间与黑体光谱辐射强度的函数关系式，具体算法见附录 A。

6.3 标定误差

6.3.1 根据标定数据反算黑体炉光谱辐射强度，与黑体炉设定温度下的黑体光谱辐射强度进行对比，确定标定误差。

6.3.2 当标定误差超过 3% 时，应检查光谱检测系统和黑体炉是否工作正常，判断造成误差原因，选择正常工作的光谱检测系统和黑体炉，按照 6.2 步骤重新进行标定。

7 光谱发射率建模

在进行光谱测温前宜对辐射对象的光谱发射率分布准确建模。发射率建模前需要先构建与辐射对象具有相似辐射特性的辐射对象模型。

7.1 技术要求

7.1.1 推荐的辐射对象模型构建方法分为发射法和吸收法两种，其中发射法适用于固体表面及含有固体颗粒物的火焰，吸收法仅适用于含有固体颗粒物的火焰（详见附录 B）。

7.1.2 在采用发射法建立发射率模型时，应利用热电偶测量辐射对象模型的温度作为标准温度参考。

7.1.3 光谱发射率建模所用热电偶的技术条件要符合 JB/T9238-1999。

7.1.4 应采取必要措施,防止热电偶测温过程在收到传导、对流和辐射影响导致测量数据失真。

7.2 建模步骤

7.2.1 对光谱检测设备进行辐射标定。

7.2.2 建立与辐射对象具有相似辐射特性的辐射对象模型,并测量辐射对象模型的光谱发射率分布(参考附录B)。

7.2.3 根据光谱发射率分布检测值,选择合适的函数拟合,建立光谱发射率模型(参考附录C):

$$\varepsilon(\lambda_i) = f(\lambda_i), i = 1, 2, K, m \quad (1)$$

式中:

ε —— 光谱发射率

λ —— 波长(m)

i —— 波长序号

m —— 波长个数

7.2.4 所选函数对光谱发射率检测值的拟合优度要大于 0.8

8 基于光谱检测的温度计算步骤

8.1 读取辐射对象的光谱信号、积分时间。

8.2 根据辐射标定结果将辐射对象光谱信号转换为光谱辐射强度。

8.3 将辐射对象光谱辐射强度分布中的特征辐射及吸收峰剔除。

8.4 在得到辐射对象的 m 个波长下的光谱辐射强度 $I(\lambda_i, T)$ 后,结合光谱发射率模型建立如下的方程组:

$$I(\lambda_i, T) = \varepsilon(\lambda_i) \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5 (e^{hc/\lambda_i kT} - 1)}, i = 1, 2, K, m \quad (2)$$

式中:

$I(\lambda_i, T)$ —— 光谱辐射强度(W/m³.sr)

T —— 温度(K)

h —— 普朗克常数(J·s)

c —— 光速(m/s)

k —— 玻尔兹曼常数(J/K)

8.5 当方程组中方程的个数 m 大于等于式(1)光谱发射率模型中未知系数的个数+1 时,方程组正定或超定,可以利用枚举法求解温度和未知系数,即找到一个温度 T 和一组未知系数使得残差 $|f|$ 最小化。

$$|f|^2 = \sum_{i=1}^n \left[I(\lambda_i) - \varepsilon(\lambda_i) \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5 (e^{hc/\lambda_i kT} - 1)} \right]^2, i = 1, 2, K, m \quad (3)$$

附 录 A

(规范性)

光谱检测系统辐射标定算法

黑体炉辐射标定数据中包含多组积分时间和光谱信号强度对应的光谱辐射强度,据此可以建立辐射标定函数。

设待定系数矩阵为 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & K & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & L & a_{2p} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & L & a_{3p} \\ M & M & M & O & M \\ a_{p1} & a_{p2} & a_{p3} & L & a_{pp} \end{bmatrix}$ ，则光谱检测系统在波长 λ 下检测到的光

谱辐射强度 I_λ 可以表示为积分时间 τ 和光谱信号强度 $counts_\lambda$ 的辐射标定函数：

$$\begin{aligned} I_\lambda &= f(\tau, counts_\lambda) \\ &= \exp(\mathbf{B}^T \mathbf{A} \mathbf{C}) \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

$$= \exp \left\{ \begin{bmatrix} 1 & \ln(\tau) & \ln(\tau)^2 & L & \ln(\tau)^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & K & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & L & a_{2p} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & L & a_{3p} \\ M & M & M & O & M \\ a_{p1} & a_{p2} & a_{p3} & L & a_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \ln(counts_\lambda) \\ \ln(counts_\lambda)^2 \\ M \\ \ln(counts_\lambda)^p \end{bmatrix} \right\}$$

式中：

p ——辐射标定函数的阶数，推荐 $p=3$

a_{ij} ——辐射标定函数中的系数， $i=1,2,K,p$ ， $j=1,2,K,p$

将黑体炉辐射标定数据带入式(A-1)，通过二元非线性回归可以求得待定系数矩阵 \mathbf{A} ，建立辐射标定函数。在实际检测过程中，将光谱检测系统的积分时间和光谱信号强度带入式(A-1)，可以得到被测对象的辐射强度。

附录 B

(资料性)

辐射对象模型构建及光谱发射率检测方法

推荐的辐射对象模型构建方法分为发射法和吸收法两种。

B.1 发射法

发射法适用于固体表面及含有固体颗粒物的火焰,对应的辐射对象模型构建及光谱发射率检测方法如下:

当辐射对象为固体表面:

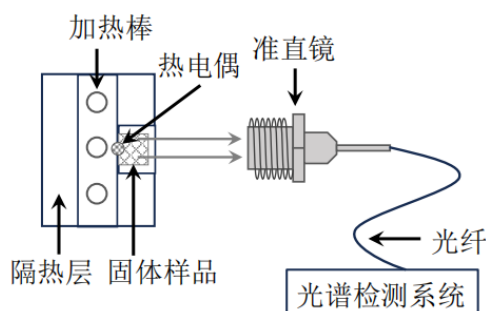


图 B-1 固体表面的发射法发射率建模方法

a) 取与固体表面辐射对象成分相同的方形块状样品,表面打磨平整,保持与辐射对象表面相同的粗糙度。若辐射对象表面粗糙度不均匀,则取均值作为参考;

b) 样品尺寸建议取 $50\times 50\times 5$ mm;

c) 利用电阻丝在样品背面加热,加热过程中做好保温措施;

d) 将样品加热到辐射对象的工作温度范围的上限、中值和下限,采集光谱辐射强度,每个温度采集三次以上,相同温度下的光谱辐射强度取均值;

e) 加热过程中样品的温度可以通过紧贴在样品背面中心处的热电偶检测。

当辐射对象为含有固体颗粒物的火焰:

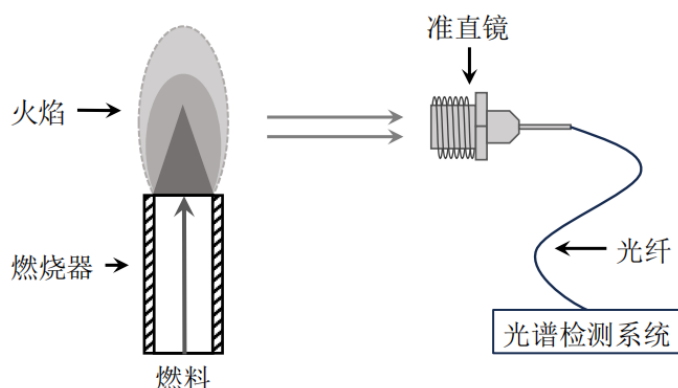


图 B-2 含有固体颗粒物的火焰的发射法发射率建模方法

a) 取与目标火焰相同的燃料接入燃烧器中点燃;

b) 若燃料为气体,宜采用扩散燃烧器;

c) 若燃料为固体粉末,宜采用中心带粉管的 Hencken、McKenna 型燃烧器或沉降炉;

d) 采集火焰高度 $3/4$ 、 $1/2$ 、 $1/4$ 处的光谱辐射强度,每个位置采集三次以上,同一位置处

的光谱辐射强度取均值；

e) 利用热电偶测量火焰上述对应位置处的温度，从火焰中心到边缘沿径向等距取三个点位测量，取均值。

对于上述发射法，光谱发射率可以通过下式计算：

$$\varepsilon(\lambda_i) = \frac{I(\lambda_i)}{I_b(\lambda_i, T_t)} \quad (\text{B-1})$$

式中：

$I_b(\lambda_i, T)$ ——黑体光谱辐射强度(W/m³.sr)

T_t ——热电偶检测到的辐射对象模型的温度(K)

B.2 吸收法

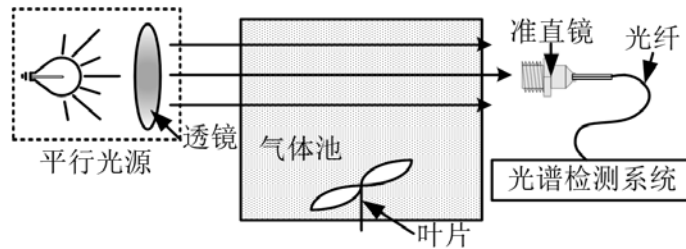


图 B-3 含有固体颗粒物的火焰的吸收法发射率建模方法

吸收法仅适用于含有固体颗粒物的火焰，对应的辐射对象模型构建及光谱发射率检测方法如下：

- 取与目标火焰成分相同的燃烧产物置于石英气体池中；
- 利用气体池中内置的叶片吹扫燃烧产物；
- 将可见光平行光源和光谱检测系统的接收端置于石英气体池两端，光谱检测系统透过石英气体池采集光谱辐射强度，得到光源透过石英气体池后被光谱检测系统接收到的光谱辐射强度；
- 移除石英气体池，光谱检测系统直接采集可见光光源的光谱辐射强度，得到光源发出的光谱辐射强度。

对于上述吸收法，光谱发射率可以通过下式计算：

$$\varepsilon(\lambda_i) = \frac{I_{\text{光源}}(\lambda_i) - I_{\text{透射}}(\lambda_i)}{I_{\text{透射}}(\lambda_i)} \quad (\text{B-2})$$

式中：

$I_{\text{光源}}(\lambda_i)$ ——光源发出的光谱辐射强度(W/m³.sr)

$I_{\text{透射}}(\lambda_i)$ ——光源透过石英气体池后被光谱检测系统接收到的光谱辐射强度(W/m³.sr)

附录 C
(资料性)
推荐的发射率模型

推荐的发射率模型包括：

a) 多项式发射率模型

$$\varepsilon(\lambda_i) = \sum_{j=0}^q a_j \lambda_i^j \quad (\text{C-1})$$

式中：

a_i —— 多项式的系数

q —— 多项式的阶数

多项式发射率模型适用于固体表面或含有固体颗粒物的火焰，多项式的阶数 q 过大会导致过拟合，建议多项式的阶数 $q \leq 4$ 。

b) 多项式自然对数发射率模型

$$\ln \varepsilon(\lambda_i) = a_0 + \sum_{j=1}^q a_j \lambda_i^j \quad (\text{C-2})$$

多项式自然对数发射率模型适用于固体表面或含有固体颗粒物的火焰，多项式的阶数 q 过大会导致过拟合，建议多项式的阶数 $q \leq 4$ 。

c) Hottel 发射率模型

$$\varepsilon(\lambda_i) = 1 - \exp\left(-\frac{\kappa l}{\lambda_i^\alpha}\right) \quad (\text{C-3})$$

式中：

κ —— 与碳烟浓度成比例的一个系数

l —— 光学路径长度

α —— 经验参数

Hottel 发射率模型适用于碳烟火焰，在可见光波段内，可以取 $\alpha = 1.39$ 。

参考文献

- [1] GB/T16839.1 热电偶 第 1 部分：分度表
- [2] GB/T16839.2 热电偶 第 2 部分：允差
- [3] JB/T9238 工业热电偶技术条件
- [4] GB/T 13277.1 压缩空气 第 1 部分：污染物净化等级
- [5] GB/T 1576 工业锅炉水质
- [6] GB/T 12145 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量
- [7] GB/T10184 电站锅炉性能试验规程