



中华人民共和国国家标准

GB/T 46084—2025

燃煤锅炉火焰温度图像检测技术规范

Technical specifications of flame-temperature image
detection for coal-fired boiler

2025-08-29 发布

2026-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本原理、方法及要求..... 2

5 火焰温度图像检测系统组成 3

6 火焰温度图像检测系统布置及维护 4

7 火焰图像检测器标定 5

8 火焰温度图像检测 5

附录 A（资料性） 火焰温度图像测量原理 7

附录 B（资料性） 图像存储容量计算方法 14

附录 C（资料性） 固定式火焰温度图像检测器布置示意图 16

附录 D（资料性） 火焰图像检测器标定方法 18

附录 E（资料性） 火焰温度图像计算方法 21

参考文献 24

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAT/TC 262)提出并归口。

本文件起草单位：中国矿业大学、中国特种设备检测研究院、华北电力科学研究院有限责任公司、西安热工研究院有限公司、华中科技大学、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、上海锅炉厂有限公司、东南大学、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、北京京能电力股份有限公司、浙江浙能电力股份有限公司、天津中煤能源华北有限公司、杭州浙大天元科技有限公司、北方联合电力有限责任公司包头第三热电厂、长江大学、江苏汉光智能科技有限公司。

本文件主要起草人：余波、李军、刘峰、周怀春、程亮、张向宇、孙亦鹏、刘成永、娄春、王凤君、冉榮铭、高琴、许传龙、吕为智、赵凯、刘宏芳、刘进、白德龙、王静杰、谢佳、杜骏、王准、方毅波、周强、钱立书、刘方、邹俊、张引弟、周远科。

引 言

火焰温度图像检测是一种基于可见光图像采集和处理的火焰温度测量方法,可实现火焰图像的在线显示和火焰温度的精确测量,具有非接触式测量、实时测量动态温度场、测温范围广、多种显示方式以及远程监测等优点,广泛应用于燃煤锅炉、燃油锅炉、生物质锅炉、垃圾焚烧炉以及钢铁、化工、水泥行业的燃煤燃油工业窑炉。近年来,火焰温度图像检测的分辨率和温度测量精度不断提高,在燃烧状态监测、火焰温度场测量、燃烧稳定性监测等领域发挥着重要作用,是实现锅炉运行数字化、智能化的重要手段。发展火焰温度图像检测技术可为燃烧基础理论研究、先进燃烧技术研发、锅炉和工业炉窑燃烧控制提供基础检测技术支持。

燃煤锅炉火焰温度图像检测技术规范

1 范围

本文件给出了燃煤锅炉火焰温度图像检测技术基本原理,规定了检测系统硬件和软件、布置与维护、检测器标定、检测等方面技术要求,给出了火焰图像检测计算方法。

本文件适用于燃煤锅炉火焰无接触温度图像检测,燃油锅炉、生物质锅炉、垃圾焚烧炉及燃煤燃油工业窑炉火焰温度无接触图像检测参照执行。

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/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/T 13277.1 压缩空气 第1部分:污染物净化等级

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

火焰图像 flame image

火焰辐射经成像元件模数转换后形成的可见光彩色图像。

3.2

火焰图像 RGB 值 RGB value of flame image

火焰辐射在红、绿、蓝三个基色下的刺激值。

注: R 指红, G 指绿, B 指蓝。

3.3

火焰图像成像元件 flame image component

获得火焰图像的 CCD(电荷耦合器)或 CMOS(互补金属氧化物半导体)传感器。

3.4

火焰温度图像 flame temperature image

火焰图像处理后可获得的温度信息图像。

3.5

温度相对误差 relative temperature deviation

火焰图像温度检测值与实际值的相对误差。

3.6

黑体辐射源 blackbody radiator source

用于检定或校准辐射温度计、具有稳定控制的温度和明确发射率,且热辐射特性接近于黑体的凹形

装置。

注：亦称黑体炉、人工黑体或模拟黑体。

[来源:JJG 856—2015,3.1.6,有修改]

3.7

火焰图像异常 abnormal flame image

火焰图像花屏、亮度异常等情况。

3.8

火焰温度图像异常 abnormal flame temperature image

图像中火焰温度超出合理范围或因火焰图像异常导致的检测结果异常。

3.9

成像元件噪声 imaging sensor noise

成像元件因自身原因在无输入信号时,模数转换过程致使红、绿、蓝通道输出值偏离零点基准。

3.10

窄带通滤色片 narrow bandpass filter

在 RGB 响应波长范围内半带宽小于 20 nm 的滤色片。

3.11

光谱灵敏度系数 spectrum sensitivity coefficient

火焰图像成像元件光电传感器对不同波长的入射光的响应效率。

3.12

标定系数 calibration coefficient

通过黑体辐射源标定火焰图像检测器,建立黑体辐射强度与图像 RGB 值之间的系数矩阵。

4 基本原理、方法及要求

4.1 测量原理

火焰辐射来自火焰中一些化学性能稳定的燃烧产物的光谱带,火焰辐射光谱经火焰成像元件的滤色层分解为 RGB 三基色后进入成像元件,转换成与光强度成正比的电荷量,经模数转换后存储为火焰图像。通过黑体辐射源标定,可从火焰图像 RGB 值中得到火焰辐射强度信号,假定炉内火焰在可见光波段内为灰体,发射率不随波长变化,根据普朗克定律计算获得火焰温度图像。火焰温度图像测量原理见附录 A。

4.2 火焰温度图像计算步骤

火焰温度图像计算步骤见图 1,具体步骤如下:

- a) 通过黑体辐射源标定火焰图像检测器获得标定系数;
- b) 通过火焰图像检测器获得火焰图像;
- c) 从火焰图像中提取 RGB 值,根据标定系数和火焰温度图像计算方法获得火焰温度图像。

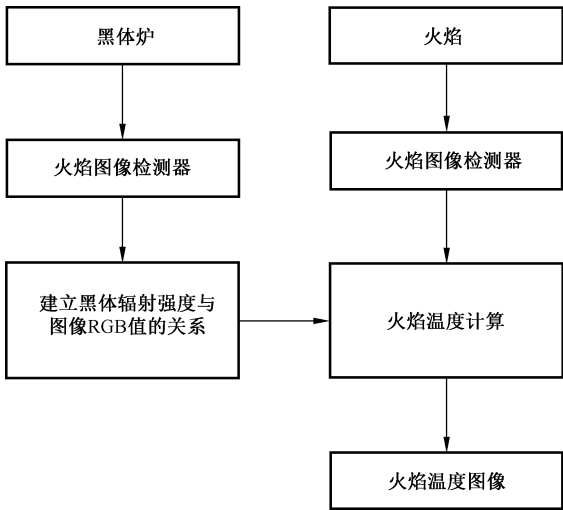


图 1 火焰温度图像计算步骤

4.3 一般要求

- 4.3.1 采集的火焰图像分辨率不低于 320 像素×240 像素。
- 4.3.2 采集的火焰图像 RGB 值均应小于图像位深的二次幂,且不应低于成像元件噪声。
- 4.3.3 黑体辐射源图像标定和火焰图像采集过程中火焰图像检测器参数设置应保持一致,主要参数包括曝光时间、白平衡、自动增益等。
- 4.3.4 火焰图像检测器主要接收火焰在可见光波段(380 nm~780 nm)内的辐射,火焰温度检测范围通常为 800 ℃~2 500 ℃,检测火焰温度不应过低,避免成像元件噪声影响检测精度。

5 火焰温度图像检测系统组成

5.1 基本要求

火焰温度图像检测系统包括硬件和软件,可采用固定式或移动式,系统应选用技术成熟可靠、稳定性好的产品,且便于拆装维护。

5.2 火焰温度图像检测系统硬件

5.2.1 火焰温度图像检测系统硬件包括火焰图像检测器、保护系统、冷却系统、信号传输系统和数据处理系统,硬件组成示意图见图 2。

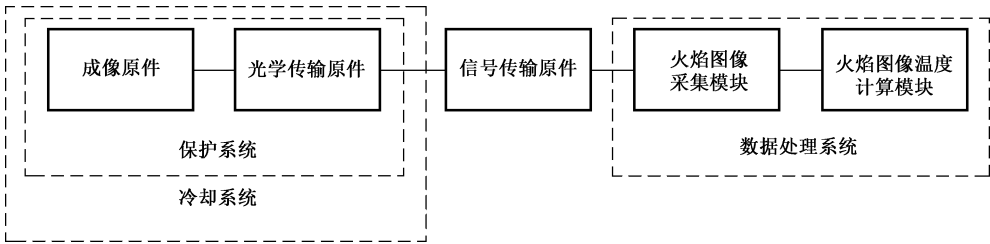


图 2 火焰温度图像检测系统硬件组成示意图

5.2.2 火焰图像检测器包括火焰图像成像元件和光学传输元件,要求如下。

- a) 成像元件所用的火焰图像成像元件采集数字信号或者模拟信号。成像元件应具有较高的图像分辨率,图像位深应不小于 8 bits,成像元件接口标准宜采用千兆以太网通信协议。
- b) 光学传输元件把采集的图像通过透镜组传输到成像元件;光学传输元件中的透镜组应方便拆卸及更换;光学传输元件应具备调焦功能,保证采集的火焰图像清晰。

5.2.3 保护系统包括保护套管以及套管内的冷却介质管路,保护套管应选用耐高温的不锈钢。保护系统可根据使用环境选择安装火焰图像检测器进退控制模块,进退控制模块可选用气动或电动方式,控制火焰图像检测器前进或后退。移动式系统可不配置进退控制模块。

5.2.4 信号传输系统包括供电的电缆、传输火焰图像信号的光纤或网线、信号转换设备。当火焰图像检测器数量较多时,在信号传输系统中应增加网络交换机。

5.2.5 传输火焰图像信号宜采用数字信号传输,可采用光纤或网线,数据传输速率不低于 1 GB/s,当信号传输距离大于 80 m 时,宜采用光纤传输。

5.2.6 冷却系统的冷却介质可选用空气或水。采用空冷时冷却空气应清洁、干燥,颗粒物等级应符合 GB/T 13277.1 的相关要求。采用水冷时应采用清洁的软水或除盐水,水质满足 GB/T 1576 或 GB/T 12145 的相关要求。

5.2.7 数据处理系统应具有较快的运算速率和较大的信息存储空间,硬盘图像存储容量根据采集频率、图像大小以及采集时长进行配置,硬盘图像存储容量计算方法可参考附录 B。

5.3 火焰温度图像检测系统软件

5.3.1 火焰温度图像检测系统软件部署在数据处理系统中,包括火焰图像采集模块和火焰图像温度计算模块,要求如下。

- a) 火焰图像采集模块应具备成像元件控制功能,包括成像元件曝光时间调节、火焰图像帧率控制、火焰图像信息采集及存储功能。
- b) 成像元件曝光时间调节功能中应根据实际火焰情况对成像元件曝光时间进行调节。
- c) 火焰图像帧率控制功能应能设置不同的火焰图像采集帧率。
- d) 火焰温度图像计算模块能够提取火焰图像 RGB 值信息,并输出火焰温度图像,火焰温度图像刷新频率不低于 1 帧/s;火焰温度图像计算软件能够输出并保存火焰温度图像计算结果。

5.3.2 火焰图像信息采集及存储功能应能够保存火焰原始图像和火焰温度图像,存储格式及存储时间可修改,应具备历史数据查询和更新功能。

6 火焰温度图像检测系统布置及维护

6.1 火焰温度图像检测系统布置要求

6.1.1 煤粉锅炉固定式火焰温度图像检测系统宜布置在燃烧器送风通道,检测器前端应距离燃烧器喷口截面不少于 50 mm,如安装在其他位置应采取可靠的防沾污和防烧损措施,其他类型锅炉燃烧器固定式火焰温度图像检测系统的布置可参照执行,不同燃烧方式火焰温度图像检测器安装示意图见附录 C。

6.1.2 固定式火焰温度图像检测系统应布置定位装置,保证火焰图像检测器在安装时的准确定位。

6.1.3 固定式火焰温度图像检测系统应保证火焰图像不产生旋转,确保火焰图像方位与实际情况一致。

6.1.4 固定式火焰温度图像检测系统供电电缆和视频信号光纤应留有足够长度,以保证炉体热态下沉时不被拉断。电缆及光纤的铺设应避开高温区域,减少信号衰减。

6.1.5 固定式火焰图像检测器应采取防磨措施,避免风道或炉膛内固体颗粒对设备的磨损。

6.1.6 固定式火焰温度图像检测系统中应布置测温热电偶,当温度超过火焰图像采集相机正常工作温

度时,将火焰图像检测器退出,并对冷却系统进行检查。

6.1.7 移动式火焰温度图像检测系统可布置在炉膛四周观火孔或者其他预先开孔的检测位置,并采取有效措施维持检测系统稳定可靠。

6.1.8 移动式火焰温度图像检测系统在使用过程中,炉墙或其他装置不应遮挡火焰图像检测器的视场。

6.1.9 移动式火焰温度图像检测系统信号电缆及电源电缆应避开高温部件。

6.2 火焰温度图像检测系统维护

6.2.1 当火焰图像异常或者火焰温度图像异常时应退出火焰图像检测器,并进行检查维护。

6.2.2 应利用停炉检修期间退出火焰图像检测器进行检查维护。

6.2.3 火焰温度图像检测系统定期维护内容包括镜头清洗、镜头更换等。

7 火焰图像检测器标定

7.1 技术要求

7.1.1 火焰图像检测器标定的目的是校正火焰图像 RGB 值,使之正确反映火焰光谱特性在 RGB 代表性波长下的光谱强度,火焰图像检测器标定方法见附录 D。

7.1.2 根据实际应用场景,标定温度宜不超过 1 800 ℃,并不低于 800 ℃。

7.1.3 标定过程中黑体辐射源温度变化间隔应不超过 20 ℃。

7.1.4 标定过程中应提取火焰图像中所有有效像素 R 通道、G 通道和 B 通道的平均值。

7.1.5 标定过程中应记录黑体辐射源温度、成像元件曝光时间、火焰图像 RGB 值。

7.2 标定误差

7.2.1 根据标定数据计算黑体辐射源温度图像,并与黑体辐射源设定温度进行对比,确定温度相对误差,相对误差按公式(1)计算。

$$\sigma = \left| \frac{T_c - T_r}{T_r} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中:

σ —— 相对误差;

T_c —— 测量温度,单位为开尔文(K)或摄氏度(℃);

T_r —— 实际温度,单位为开尔文(K)或摄氏度(℃)。

7.2.2 标定过程的温度相对误差应不大于 5%,当超过时应重新进行标定。

8 火焰温度图像检测

8.1 火焰图像 RGB 转换为单色辐射强度

8.1.1 利用火焰温度图像检测系统获取火焰图像,从火焰图像中提取图像各个像素点的 RGB 值。

8.1.2 利用标定系数,计算得到火焰图像各个像素点的单色辐射强度信息。

8.2 火焰温度图像计算

8.2.1 利用火焰图像各个像素点的单色辐射强度信息计算得到各个像素点的温度,组成火焰温度图像。

8.2.2 火焰温度图像计算方法包括单色法、双色法(也可称比色法)、全波段积分法,具体计算方法见附录 E。

8.2.3 采用单色法时,成像元件前应加装窄带通滤色片。窄带通滤色片的中心波长可选择 450 nm、550 nm 和 650 nm。

8.2.4 采用双色法时,从火焰图像 RGB 值中任意选取两个信号,根据这两个信号辐射强度之间的比值求解火焰温度图像。双色法中,火焰图像成像元件的波段响应简化为单色响应处理。计算火焰温度图像时优先采用双色法。

8.2.5 采用全波段积分法时,应获得成像元件在可见光波段(380 nm~780 nm)内的光谱灵敏度系数,从火焰图像 RGB 值中迭代求解火焰温度图像。

8.3 火焰状态诊断

8.3.1 火焰温度图像检测值过高或过低时,发出报警提示,应进行相应的燃烧调整。

8.3.2 在不出现火焰图像异常或者火焰温度图像异常情况下,结合火焰温度图像检测值和运行数据综合判断燃烧状态。

附 录 A
(资料性)
火焰温度图像测量原理

A.1 火焰图像成像元件成像原理

火焰图像成像元件有黑白和彩色两种,其中彩色火焰图像成像元件的目的是模仿人眼的视觉效果,人眼视觉系统中存在三种光谱特性的色感细胞,它们的最大感光灵敏度分别落在红色、绿色和蓝色区域。1931 年国际照明委员会(以下简称 CIE)推荐的标准色度观察者光谱三刺激值规定三原色的红光波长为 700 nm、绿光波长为 546.1 nm、蓝光波长为 435.8 nm,见图 A.1。

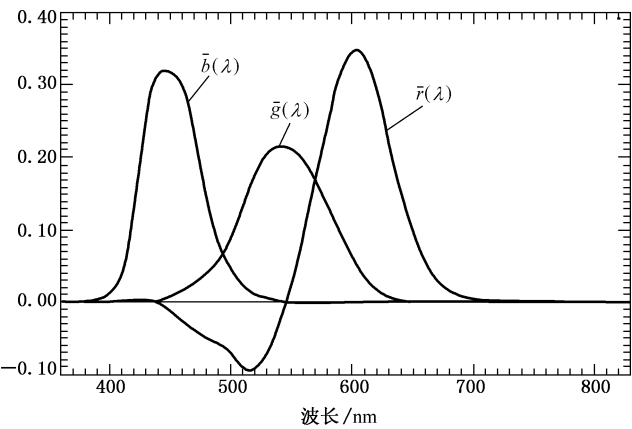


图 A.1 1931 CIE-rgb 系统标准色度观察者光谱三刺激值曲线

根据以上规定,任何物体的颜色 C 可以用式(A.1)表示:

$$C = \bar{r}(R) + \bar{g}(G) + \bar{b}(B) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- C —— 物体颜色;
- $\bar{r}(R)$ —— 颜色 R 的三刺激值;
- $\bar{g}(G)$ —— 颜色 G 的三刺激值;
- $\bar{b}(B)$ —— 颜色 B 的三刺激值。

通常情况下,可见光非单一光谱,是光谱功率分布函数 $P(\lambda)$,将各光谱的三刺激值与光谱功率分布函数相乘才能得到图像红、绿、蓝值的响应结果。设图像红色刺激值的总和为 R ,图像绿色刺激值的总和为 G ,图像蓝色刺激值的总和为 B ,则公式(A.2)如下:

$$\begin{cases} R = k_r \int_{380}^{780} P(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\ G = k_g \int_{380}^{780} P(\lambda) g(\lambda) d\lambda \\ B = k_b \int_{380}^{780} P(\lambda) b(\lambda) d\lambda \end{cases} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- R —— 图像红色通道响应值;
- G —— 图像绿色通道响应值;

- B ——图像蓝色通道响应值；
 k_r ——红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_g ——绿色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_b ——蓝色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 λ ——波长；
 $P(\lambda)$ ——波长 λ 下的光谱功率分布值；
 $r(\lambda)$ ——红色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $g(\lambda)$ ——绿色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $b(\lambda)$ ——蓝色通道对外界辐射的光谱响应函数。

采用求和方式,则公式(A.3)如下:

$$\begin{cases} R = k_r \sum_{380}^{780} P(\lambda) r(\lambda) d\lambda \\ G = k_g \sum_{380}^{780} P(\lambda) g(\lambda) d\lambda \\ B = k_b \sum_{380}^{780} P(\lambda) b(\lambda) d\lambda \end{cases} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- R ——图像红色通道响应值；
 G ——图像绿色通道响应值；
 B ——图像蓝色通道响应值；
 k_r ——红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_g ——绿色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_b ——蓝色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 λ ——波长；
 $P(\lambda)$ ——波长 λ 下的光谱功率分布值；
 $r(\lambda)$ ——红色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $g(\lambda)$ ——绿色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $b(\lambda)$ ——蓝色通道对外界辐射的光谱响应函数。

其中, $r(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ 、 $b(\lambda)$ 三通道对外界辐射的光谱响应函数,见图 A.2。

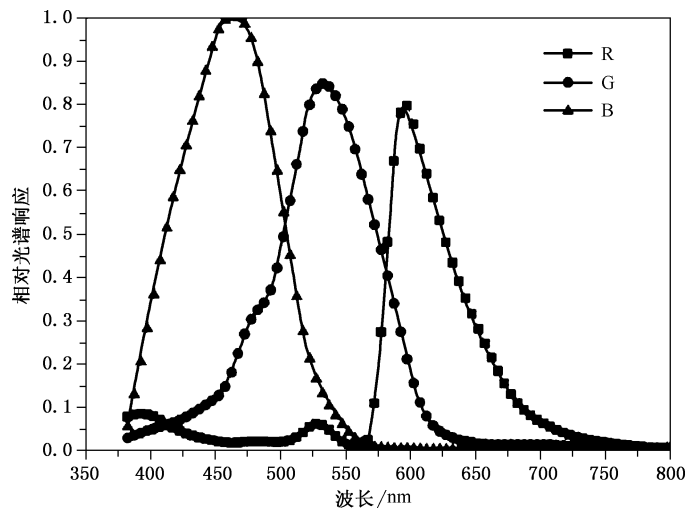


图 A.2 火焰图像成像元件红、绿、蓝三通道光谱响应函数

A.2 火焰辐射成像

A.2.1 根据光度学原理,由发光火焰引起的亮度取决于它的发光通量 ϕ ,用公式(A.4)表示:

$$\phi = \int_0^\infty \epsilon_\lambda E_\lambda(T) c(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- ϕ —— 火焰发光通量;
- λ —— 波长;
- ϵ_λ —— 波长 λ 下的火焰辐射率;
- T —— 火焰温度;
- $E_\lambda(T)$ —— 波长 λ 下、温度 T 的火焰黑体辐射出射度;
- $c(\lambda)$ —— 火焰图像成像元件在波长 λ 下的光谱响应函数。

A.2.2 火焰图像成像元件摄取图像时,其靶面上光照度 E 取决于火焰的发光通量 ϕ ,用公式(A.5)表示:

$$E = K_1 \phi \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

- E —— 光照度;
- K_1 —— 比例系数,摄像头的面积与辐射面积之比;
- ϕ —— 火焰发光通量。

A.2.3 由光电转换原理:单位时间内,受光照射的电极上释出的电子数和入射光的强度成正比,则火焰图像成像元件输出的亮度 U 可用公式(A.6)表示:

$$U = K_2 E \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

- U —— 火焰成像元件输出的亮度;
- K_2 —— 比例常数;
- E —— 光照度。

A.2.4 考虑炉内燃烧温度通常低于 2 000 ℃,用维恩辐射定律取代普朗克定律,可得公式(A.7):

$$I_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi \lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

$I_b(\lambda, T)$ ——在温度 T 、波长 λ 下的黑体辐射强度;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

λ ——波长;

T ——温度。

由公式(A.4)~公式(A.7)可得公式(A.8):

$$U = K_1 K_2 \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

K_1 ——比例系数,摄像头的面积与辐射面积之比;

K_2 ——比例常数;

λ ——波长;

ϵ_{λ} ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度;

$c(\lambda)$ ——火焰图像成像元件在波长 λ 下的光谱响应函数。

A.2.5 针对可见光火焰图像成像元件,公式(A.8)可写成公式(A.9)或公式(A.10):

$$U = K_1 K_2 \int_{380}^{780} \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

K_1 ——比例系数,摄像头的面积与辐射面积之比;

K_2 ——比例常数;

λ ——波长;

ϵ_{λ} ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度;

$c(\lambda)$ ——火焰图像成像元件在波长 λ 下的光谱响应函数。

或

$$U = K_1 K_2 \sum_{380}^{780} \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

K_1 ——比例系数,摄像头的面积与辐射面积之比;

K_2 ——比例常数;

λ ——波长;

ϵ_{λ} ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度;

$c(\lambda)$ ——火焰图像成像元件在波长 λ 下的光谱响应函数。

A.2.6 当在镜头前设置一窄带通滤色片(单色滤色片),公式(A.10)可简化为公式(A.11):

$$U = K_1 K_2 \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c(\lambda) \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

K_1 ——比例系数,摄像头的面积与辐射面积之比;

K_2 ——比例常数;

λ ——波长;

ϵ_λ ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度;

$c(\lambda)$ ——火焰图像成像元件在波长 λ 下的光谱响应函数。

令 $k = K_1 K_2 c(\lambda)$,则公式(A.11)可简化为公式(A.12):

$$U = k \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

k ——比例系数;

λ ——波长;

ϵ_λ ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度。

A.2.7 通常在不采用窄带通滤色片的情况下,由于光谱响应峰宽有限,可采用光谱响应曲线峰值波长(特征波长)来取代滤色片波长,公式(A.9)、公式(A.10)得到的是光谱响应波长范围内的积分项,将其简化成公式(A.13):

$$U = \varphi k \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

φ ——积分修正;

k ——比例系数;

λ ——波长;

ϵ_λ ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 ——第一普朗克常数;

C_2 ——第二普朗克常数;

T ——火焰温度。

A.2.8 将 φ 与 k 合并,则公式(A.13)可表示为公式(A.14):

$$U = k' \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

U ——火焰成像元件输出的亮度;

k' ——常数,比例系数 k 与积分修正 φ 乘积;

λ ——波长;

ϵ_λ ——波长 λ 下的火焰辐射率;

C_1 —— 第一普朗克常数；

C_2 —— 第二普朗克常数；

T —— 火焰温度。

A.2.9 公式(A.14)是单位时间的响应结果,考虑相机的积分特性,还需要考虑时间对图像亮度影响,因此在标定和检测时对应的曝光时间应一致。

A.2.10 当采用彩色火焰图像成像元件进行火焰图像采集时,在可见光 380 nm~780 nm 范围内,将 $K_1 K_2$ 乘积看作常数,则公式(A.9)、公式(A.10)可表示为公式(A.15)、公式(A.16)。

$$\begin{cases} R = k_r \int_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_r(\lambda) d\lambda \\ G = k_g \int_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_g(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.15) \\ B = k_b \int_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_b(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

式中:

R —— 图像红色通道响应值；

G —— 图像绿色通道响应值；

B —— 图像蓝色通道响应值；

k_r —— 红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

k_g —— 绿色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

k_b —— 蓝色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

λ —— 波长；

ϵ_λ —— 波长 λ 下的火焰辐射率；

C_1 —— 第一普朗克常数；

C_2 —— 第二普朗克常数；

T —— 火焰温度；

$c_r(\lambda)$ —— 火焰图像红色通道在波长 λ 下的光谱响应函数；

$c_g(\lambda)$ —— 火焰图像绿色通道在波长 λ 下的光谱响应函数；

$c_b(\lambda)$ —— 火焰图像蓝色通道在波长 λ 下的光谱响应函数。

或

$$\begin{cases} R = k_r \sum_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_r(\lambda) d\lambda \\ G = k_g \sum_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_g(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (A.16) \\ B = k_b \sum_{380}^{780} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T} c_b(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

式中:

R —— 图像红色通道响应值；

G —— 图像绿色通道响应值；

B —— 图像蓝色通道响应值；

k_r —— 红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

k_g —— 绿色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

k_b —— 蓝色通道的增益和光信号转换系数的乘积；

λ —— 波长；

- ϵ_{λ} —— 波长 λ 下的火焰辐射率；
- C_1 —— 第一普朗克常数；
- C_2 —— 第二普朗克常数；
- T —— 火焰温度；
- $c_r(\lambda)$ —— 火焰图像红色通道在波长 λ 下的光谱响应函数；
- $c_g(\lambda)$ —— 火焰图像绿色通道在波长 λ 下的光谱响应函数；
- $c_b(\lambda)$ —— 火焰图像蓝色通道在波长 λ 下的光谱响应函数。

附录 B

(资料性)

图像存储容量计算方法

B.1 图像占用空间

B.1.1 灰度图像,图像大小按公式(B.1)计算:

$$im = m \times n \times dep / 8 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

im ——图像大小,单位为字节(Byte);

 m ——图像横向尺寸,单位为像素; n ——图像纵向尺寸,单位为像素;

dep ——图像位深,单位为位(bit)。

B.1.2 RGB 图像,图像大小按公式(B.2)计算:

$$im = m \times n \times (dep_r + dep_g + dep_b) / 8 \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

im ——图像大小,单位为字节(Byte);

 m ——图像横向尺寸,单位为像素; n ——图像纵向尺寸,单位为像素;

dep_r ——图像中红色的深度,单位为位(bit);

dep_g ——图像中绿色的深度,单位为位(bit);

dep_b ——图像中蓝色的深度,单位为位(bit)。

B.2 火焰图像存储空间

火焰图像存储空间按公式(B.3)计算:

$$STC = im \times t \times f \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

STC ——火焰图像存储容量,单位为字节(Byte);

im ——图像大小,单位为字节(Byte);

 t ——采集时长,单位为秒(s); f ——采集频率,单位为赫兹(Hz)。

B.3 计算例

表 B.1 给出不同图像大小、采集频率及采集时长下图像存储容量,现场根据具体情况,进行存储容量配置。

表 B.1 图像存储容量计算

算例	图像尺寸		图像位深	图像类别	采集频率 Hz	采集时间 h	图像存储空间 GB
	宽度/像素	高度/像素					
1	320	240	8	RGB 图像	1	1	0.26

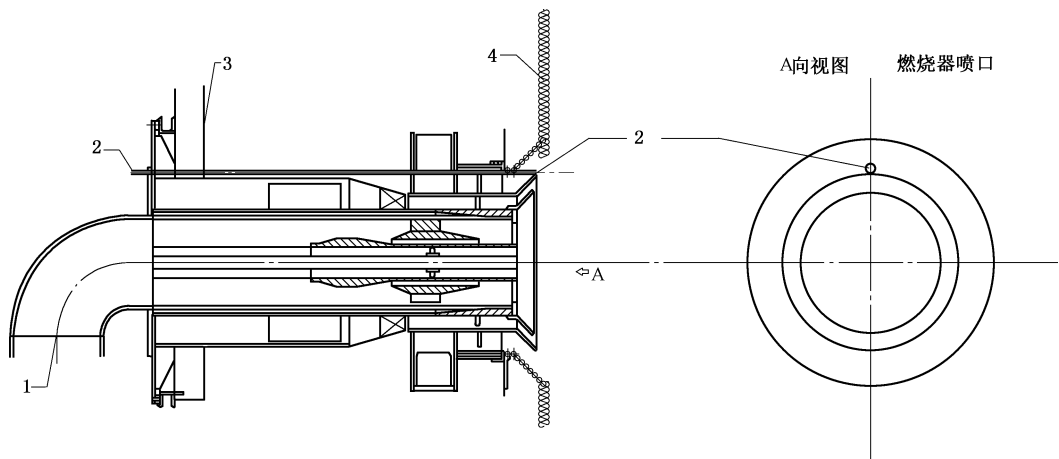
表 B.1 图像存储容量计算（续）

算例	图像尺寸		图像位深	图像类别	采集频率 Hz	采集时间 h	图像存储空间 GB
	宽度/像素	高度/像素					
2	512	512	8	RGB 图像	1	1	0.88
3	1 024	768	8	RGB 图像	1	1	2.64
4	1 024	1 024	8	RGB 图像	1	1	3.52
5	320	240	8	RGB 图像	1	24	6.18
6	512	512	8	RGB 图像	1	24	21.09
7	1 024	768	8	RGB 图像	1	24	63.28
8	1 024	1 024	8	RGB 图像	1	24	84.38
9	320	240	8	RGB 图像	1	1	0.26
10	512	512	8	RGB 图像	1	1	0.88
11	1 024	768	8	RGB 图像	1	1	2.64
12	1 024	1 024	8	RGB 图像	1	1	3.52
13	320	240	8	RGB 图像	1	24	6.18
14	512	512	8	RGB 图像	1	24	21.09
15	1 024	768	8	RGB 图像	1	24	63.28
16	1 024	1 024	8	RGB 图像	1	24	84.38
注 1：1 GB=1 024 MB=1 024×1 024 KB=1 024×1 024×1 024 Byte。							
注 2：1 Byte=8 bit。							

附 录 C
(资料性)

固定式火焰温度图像检测器布置示意图

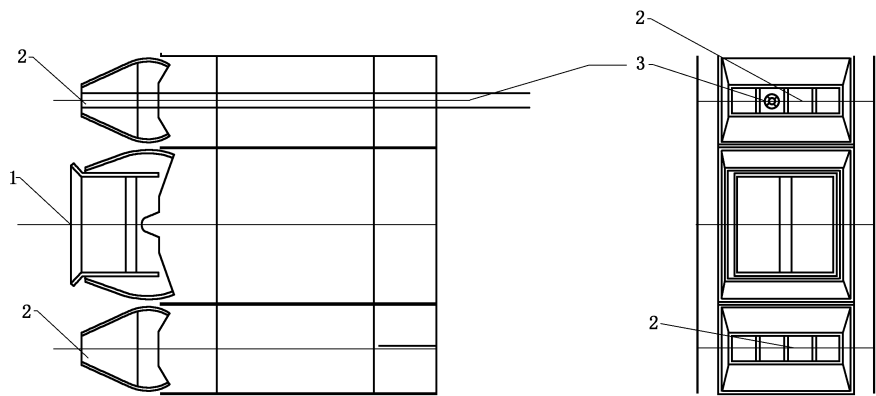
固定式火焰温度图像检测器布置示意图见图 C.1～图 C.3。



标引序号说明：

- 1——旋流燃烧器煤粉一次风管道；
- 2——火焰温度图像检测器；
- 3——二次风箱外壁；
- 4——水冷壁。

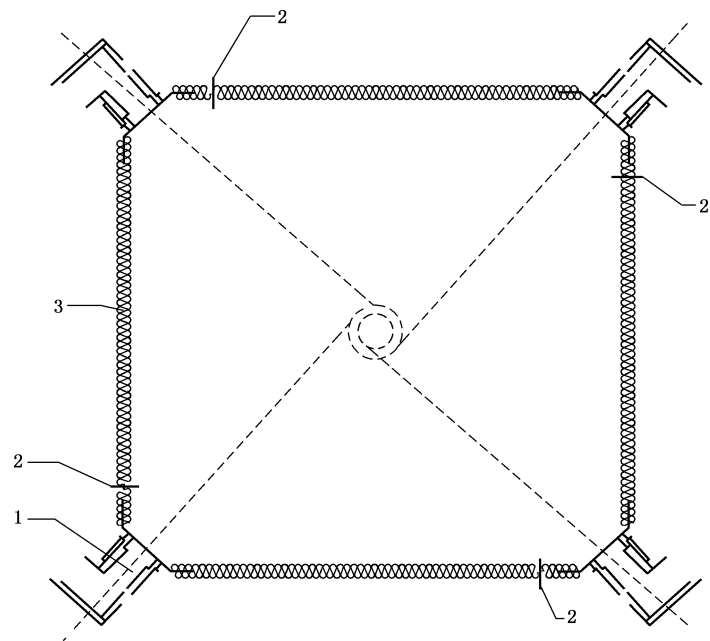
图 C.1 火焰温度图像检测器安装示意图一



标引序号说明：

- 1——直流式燃烧器煤粉一次风管道；
- 2——二次风喷口；
- 3——火焰温度图像检测器。

图 C.2 火焰温度图像检测器安装示意图二



标引序号说明：

1——燃烧器；

2——火焰温度图像检测器；

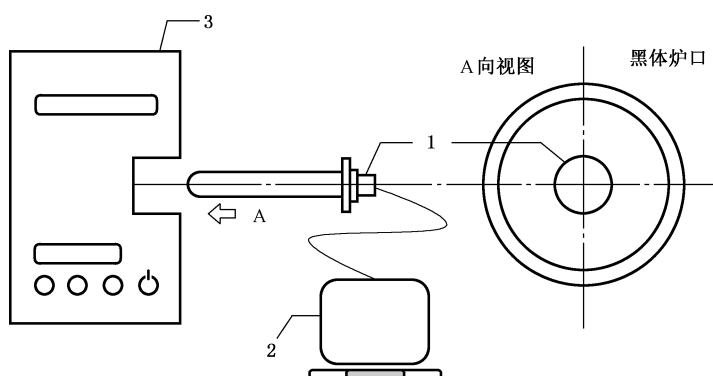
3——水冷壁。

图 C.3 火焰温度图像检测器安装示意图三

附 录 D
(资料性)
火焰图像检测器标定方法

D.1 火焰图像检测器标定系统

D.1.1 火焰图像检测器标定系统包括火焰图像检测器、黑体辐射源(含温度控制系统)和信号处理系统。火焰图像检测器标定系统示意图见图 D.1。



标引序号说明:

- 1——火焰温度图像检测器;
- 2——数据处理系统;
- 3——黑体辐射源。

图 D.1 火焰图像检测器标定系统示意图

D.1.2 黑体辐射源分为腔式黑体辐射源与面源黑体辐射源,宜采用腔式黑体辐射源。腔式黑体辐射源通过一定的腔深,内部做发黑处理,使进入空腔的电磁辐射在内壁的每一次入射都有很少的能量被反射,经过在腔内的多次反射和吸收,电磁辐射几乎全部被吸收,达到高辐射率。一般腔式黑体辐射源辐射率不小于 0.995。

D.1.3 温度控制系统是实现黑体辐射源温度准确控制的硬件设备。

D.1.4 信号处理系统是对火焰图像检测器标定系统获得的图像信息等进行处理的计算软件及装载软件的电脑设备。

D.2 火焰图像检测器标定过程

D.2.1 启动黑体辐射源,利用温度控制系统控制黑体辐射源温度升高到 800 °C,通过火焰图像检测器拍摄黑体辐射源图像,读取图像 RGB 值。

D.2.2 调节成像元件曝光时间,记录不同曝光时间下的黑体辐射源图像 RGB 值,最大曝光时间不超过图像过曝的曝光时间。

D.2.3 调节黑体辐射源温度,记录不同温度下的黑体辐射源图像 RGB 值,记录数据格式见表 D.1。

表 D.1 火焰图像检测器标定数据记录格式

采样序号	黑体辐射源温度/℃	成像元件曝光时间/s	图像 R 值	图像 G 值	图像 B 值

D.2.4 黑体辐射源温度升高到 1 800 ℃后,停止拍摄黑体辐射源图像,标定过程结束。

D.2.5 根据黑体辐射源温度和 RGB 代表性波长或 RGB 在可见光波段内的光谱灵敏度系数计算黑体单色辐射强度,在成像元件不同曝光时间下得到图像 RGB 值与黑体单色辐射强度的标定系数,见公式(D.1)。

$$I_{\lambda_r} = \sum_{i=1}^n k_{r_i} R^i + R_0$$
$$I_{\lambda_g} = \sum_{i=1}^n k_{g_i} G^i + G_0 \qquad \dots\dots\dots (D.1)$$
$$I_{\lambda_b} = \sum_{i=1}^n k_{b_i} B^i + B_0$$

式中:

I_{λ_r} ——红色光黑体单色辐射强度;

I_{λ_g} ——绿色光黑体单色辐射强度;

I_{λ_b} ——蓝色光黑体单色辐射强度;

λ_r ——红色光代表性波长;

λ_g ——绿色光代表性波长;

λ_b ——蓝色光代表性波长;

k_r ——图像 R 值的标定系数;

k_g ——图像 G 值的标定系数;

k_b ——图像 B 值的标定系数;

R ——图像红色通道响应值;

G ——图像绿色通道响应值;

B ——图像蓝色通道响应值;

i ——次方;

R_0 ——图像红色通道标定系数截距;

G_0 ——图像绿色通道标定系数截距;

B_0 ——图像蓝色通道标定系数截距。

在火焰图像检测器未加装窄带通滤色片等滤光装置时, $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 分别为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm;当火焰图像检测器加装窄带通滤色片时,此时 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 数值相等,取值均为窄带通滤色片的中心波长。

黑体单色辐射强度一般根据 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ 利用普朗克辐射定律计算得到,也可以在已知 RGB 在可见光波段内的光谱灵敏度系数时,利用公式(A.14)计算得到。

在成像元件不同曝光时间下根据测量数据拟合得到的 I_{λ_r} 与 R, I_{λ_g} 与 G, I_{λ_b} 与 B 之间的多项关系式,图 D.2 和图 D.3 给出了利用某型号火焰图像成像元件的标定系数 k_r 和 k_g 。

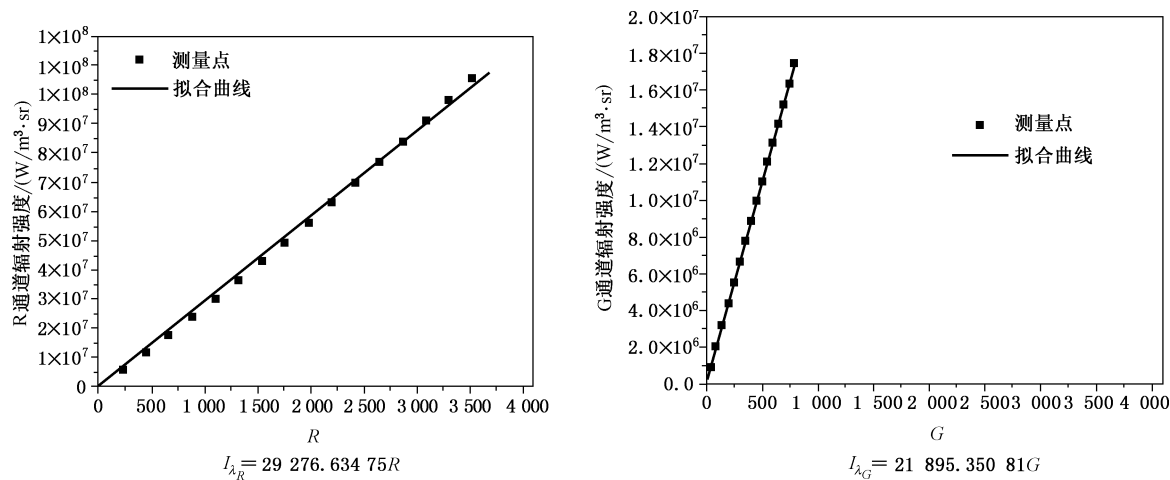


图 D.2 某数据位深为 12 bit 的火焰图像成像元件标定系数 k_r, k_g

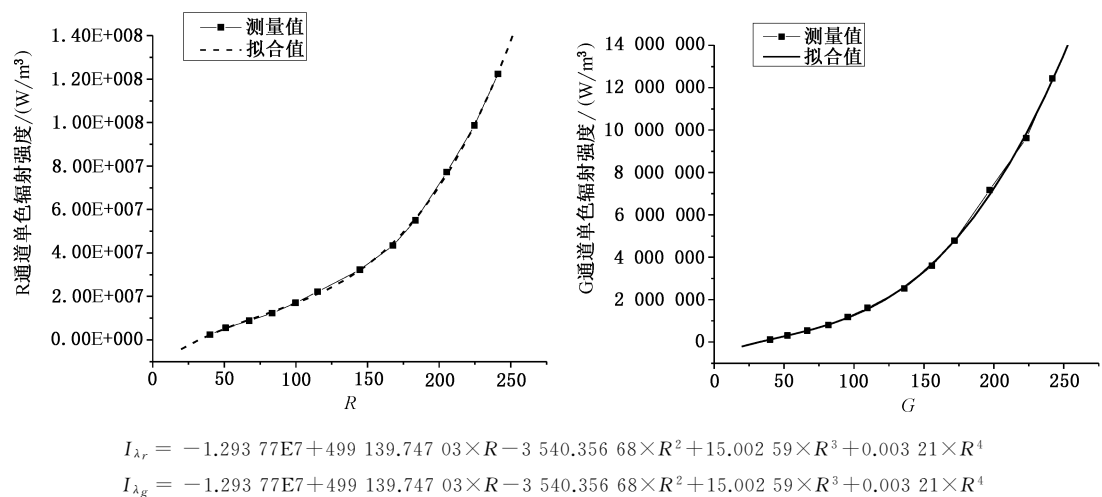


图 D.3 某数据位深为 8 bit 的火焰图像成像元件标定系数 k_r, k_g

附录 E (资料性) 火焰温度图像计算方法

E.1 单色法

单色法利用窄带通滤色片获得火焰图像,根据标定系数和给定的火焰辐射率计算火焰温度。具体步骤:

- a) 在火焰图像检测器中加装窄带通滤色片获得火焰图像,提取火焰图像灰度信号,即火焰图像成像元件输出的亮度,利用标定系数和火焰图像灰度信号计算火焰在窄带通滤色片中心波长下的火焰单色辐射强度,如公式(E.1)所示:

$$I_{\lambda} = k_{\lambda} U \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

- λ —— 波长;
- I_{λ} —— 波长 λ 下的火焰辐射强度;
- k_{λ} —— 波长 λ 下火焰图像的标定系数;
- U —— 火焰图像成像元件输出的亮度。

- b) 给定火焰辐射率,根据火焰单色辐射强度计算火焰温度图像,如公式(E.2)所示:

$$T = \frac{-C_2}{\lambda} / \ln \left(\frac{\pi k_{\lambda} U}{\epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5}} \right) \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

- T —— 温度;
- C_2 —— 第二普朗克常数;
- λ —— 波长;
- k_{λ} —— 波长 λ 下火焰图像的标定系数;
- U —— 火焰图像成像元件输出的亮度;
- ϵ_{λ} —— 波长 λ 下的火焰辐射率。

E.2 C_1 ——第一普朗克常数;双色法

E.2.1 双色法利用在 2 个波长下同时测量到的由同一点发射出的单色辐射强度的比值测量火焰温度,如公式(E.3)所示:

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / \ln \left(\frac{I_{\lambda_1} \lambda_1^5}{I_{\lambda_2} \lambda_2^5} \right) \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

- T —— 温度;
- C_2 —— 第二普朗克常数;
- λ_1 —— 选用的波长 1;
- λ_2 —— 选用的波长 2;
- I_{λ_1} —— 波长 λ_1 下的火焰辐射强度;
- I_{λ_2} —— 波长 λ_2 下的火焰辐射强度。

E.2.2 双色法的计算步骤:

- a) 利用火焰图像检测器获得火焰图像,提取火焰图像 RGB 值信号,利用标定系数和火焰图像

RGB 值信号计算火焰在 RGB 代表性波长下的单色辐射强度,如公式(E.4)所示:

$$\begin{aligned} I_{\lambda_r} &= k_r R \\ I_{\lambda_g} &= k_g G \\ I_{\lambda_b} &= k_b B \end{aligned} \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

I_{λ_r} —— 红色光黑体单色辐射强度;
 I_{λ_g} —— 绿色光黑体单色辐射强度;
 I_{λ_b} —— 蓝色光黑体单色辐射强度;
 λ_r —— 红色光代表性波长;
 λ_g —— 绿色光代表性波长;
 λ_b —— 蓝色光代表性波长;
 k_r —— 图像 R 值的标定系数;
 k_g —— 图像 G 值的标定系数;
 k_b —— 图像 B 值的标定系数;
 R —— 图像 R 值的强度值;
 G —— 图像 G 值的强度值;
 B —— 图像 B 值的强度值。

- b) 任意选取 RGB 代表性波长下的火焰单色辐射强度中的两个,根据两个单色辐射强度的比值计算火焰温度图像,如公式(E.5)所示:

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_g} \right) / \ln \left(\frac{I_{\lambda_r} \lambda_r^5}{I_{\lambda_g} \lambda_g^5} \right) = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_g} \right) / \ln \left(\frac{k_r R \lambda_r^5}{k_g G \lambda_g^5} \right) \dots\dots\dots (E.5)$$

式中:

T —— 温度;
 C_2 —— 第二普朗克常数;
 λ_r —— 红色代表波长;
 λ_g —— 绿色代表波长;
 I_{λ_r} —— 波长 λ_r 下的火焰辐射强度;
 I_{λ_g} —— 波长 λ_g 下的火焰辐射强度;
 k_r —— 图像 R 值的标定系数;
 k_g —— 图像 G 值的标定系数;
 R —— 图像 R 值的强度值;
 G —— 图像 G 值的强度值。

或采用公式(E.6):

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_b} \right) / \ln \left(\frac{I_{\lambda_g} \lambda_g^5}{I_{\lambda_b} \lambda_b^5} \right) = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_b} \right) / \ln \left(\frac{k_g G \lambda_g^5}{k_b B \lambda_b^5} \right) \dots\dots\dots (E.6)$$

式中:

T —— 温度;
 C_2 —— 第二普朗克常数;
 λ_g —— 绿色代表波长;
 λ_b —— 蓝色代表波长;
 I_{λ_g} —— 波长 λ_g 下的火焰辐射强度;

I_{λ_b} —— 波长 λ_b 下的火焰辐射强度；
 k_g —— 图像 G 值的标定系数；
 k_b —— 图像 B 值的标定系数；
 G —— 图像 G 值的强度值；
 B —— 图像 B 值的强度值。

E.3 全波段积分法

全波段积分法在双色法的基础上考虑对火焰图像成像元件实际光谱响应特性曲线的修正。利用火焰图像检测器获得火焰图像，提取火焰图像 RGB 值信号，根据标定系数和火焰图像 RGB 值中的任意两个求解火焰图像温度，具体方法为找到一个温度 T 值，使其满足公式(E.7)的最优解。

$$\frac{\int_{380}^{780} r(\lambda) \cdot C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) d\lambda}{\int_{380}^{780} g(\lambda) \cdot C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) d\lambda} - \frac{k_r}{k_g} \cdot \frac{R}{G} = 0 \quad \dots\dots\dots (E.7)$$

式中：
 $r(\lambda)$ —— 红色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $g(\lambda)$ —— 绿色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 C_1 —— 第一普朗克常数；
 λ —— 波长；
 C_2 —— 第二普朗克常数；
 T —— 温度；
 k_r —— 红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_g —— 绿色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 R —— 图像红色通道响应值；
 G —— 图像绿色通道响应值。

或采用公式(E.8)：

$$\frac{\int_{380}^{780} r(\lambda) \cdot C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) d\lambda}{\int_{380}^{780} b(\lambda) \cdot C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) d\lambda} - \frac{k_r}{k_b} \cdot \frac{R}{B} = 0 \quad \dots\dots\dots (E.8)$$

式中：
 $r(\lambda)$ —— 红色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 $b(\lambda)$ —— 蓝色通道对外界辐射的光谱响应函数；
 C_1 —— 第一普朗克常数；
 λ —— 波长；
 C_2 —— 第二普朗克常数；
 T —— 温度；
 k_r —— 红色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 k_b —— 蓝色通道的增益和光信号转换系数的乘积；
 R —— 图像红色通道响应值；
 B —— 图像蓝色通道响应值。

参 考 文 献

- [1] JJG 856 工作用辐射温度计
-

