

文章编号: 2095-2163(2020)03-0288-07

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

基于成像颜色校正的机器视觉测量甲烷预混火焰当量比的方法研究

龙 凯, 杨健晟

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 基于机器视觉采集火焰颜色, 利用火焰颜色与火焰光谱关系间接测量燃烧当量比是燃烧诊断技术的一个热点。但由于成像设备光谱响应不同, 会造成成像色偏, 从而影响测量的准确性。为了研究和解决成像过程带来的色偏影响, 本文首先对成像参数和色偏现象进行了研究。根据研究结果, 本文提出了一种基于成像颜色校正的机器视觉测量甲烷预混火焰当量比的方法, 该方法以标准色彩为标定基准, 通过白平衡的图像处理算法对成像中的色偏进行校正。最后通过实验对比, 表明利用该方法不仅能有效地改善由于白平衡不同而导致的色偏问题, 而且可大大提高传统机器视觉测量火焰当量比的线性度和准确性, 实验结果验证了该方法的可行性与有效性, 可对后续研究提供借鉴。

关键词: 当量比; 色偏现象; 颜色校正; 白平衡; 图像处理

Researching on the method of measuring flame equivalent ratio of methane premixed by machine vision based on image color correction

LONG Kai, YANG Jiansheng

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] The machine vision based measurement for the combustion equivalent ratio using the relation between flame color and its spectrum is a hot research topic in combustion diagnostic technology. However, due to the dissimilar spectral response of the different imaging device, the imaging color shift will be caused, which could affect the accuracy of the measurement. In order to study and solve the color shift effect caused during the imaging process, this paper first studies the imaging parameters and color shift principle. According to the research result, this paper proposes a method based on image color correction for premixed methane flame equivalent ratio measurement by machine vision. This method requires a white balance image processing algorithm to correct the color shift issue using the standard color calibration benchmark. Finally, the experimental comparison shows that this method can not only effectively reduce the color shift problem, but also greatly improve the linearity and accuracy of the traditional machine vision measured flame equivalent ratio results. The experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method, and it can provide reference for subsequent research.

[Key words] equivalence ratio; color shift phenomenon; color correction; white balance; image processing

0 引言

燃料是否充分完全燃烧, 对燃料是否能高效利用和降低污染气体排放起着重要的作用。通过对燃烧火焰进行监测, 从采集火焰数据中分析, 从而判断燃料处于何种燃烧状态对燃烧过程优化尤其重要。然而, 由于燃烧过程的瞬时性与复杂性, 使得火焰实时监测与燃烧状态精确诊断十分困难。为此许多学者提出了多种不同的方法来诊断燃烧状态^[1-4]。

在诊断燃烧状态的方法中, 当量比(Φ)是常被用来量化燃料-氧化剂混合物状态的参数之一^[5]。传统测量火焰当量比的方法是基于激光的检测技术或基于燃烧自发的化学发光检测。激光技术由于采

用特定波长光源, 精确度较高, 但设置复杂, 成本较高。相对复杂的激光技术, 直接对化学发光检测相对容易, 并且精度也基本满足工业检测要求。碳氢燃料燃烧中自发的化学发光是由于碳氢燃料燃烧反应时由于化合物化学键断裂会生成自由基, 大量激发态自由基在回归基态时会释放特定波长光子, 因此可用来间接反映燃烧过程。Romero 等人^[6]就曾应用基于光学发光的火焰诊断技术于燃气玻璃窑炉诊断中, 通过测量 OH * 辐射值的变化来实时监控炉内燃烧状况; Arias 等人^[7]研究表明 C₂* / CH* 可以很好地反映燃烧热效率。通过大量预混碳氢火焰实验, 研究者们还发现 CH* / C₂* 的比值与火焰中自

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2018]1030)。

作者简介: 龙 凯(1993-)男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器视觉、燃烧诊断技术; 杨健晟(1987-)男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 机器视觉、燃烧诊断技术。

通讯作者: 杨健晟 Email: 1872948102@qq.com

收稿日期: 2019-11-28

由基化学发光呈现单调关系^[8-9]。因此通过利用光谱仪或单色相机前加装窄通滤波镜,可直接测量特定波段光谱信息(特定自由基化学发光信息),从而间接获得当量比信息;但是这些方法存在一定的局限性,如采用传统的光谱仪获得的数据缺少时间与空间的信息,而后者采用单一滤波片的单色相机则无法同时测得多种自由基。

随着机器视觉技术的飞速发展,彩色数字相机的出现使得其在化学发光测量中占据了重要地位并发挥了巨大的作用。最近, Huang 等人^[10]通过实验提出利用图像中的 B 层与 G 层比值可用来近似测量 CH^*/C_2^* 的比值,并通过实验间接获得了火焰当量比图像。随后 Trindade 等人^[11]测试了该理论,验证了当量比在 0.8~1.4 之间时 CH^* 与 C_2^* 化学发光亮度值与彩色相机 B 和 G 彩色图像通道的平均像素值具有关联性。Migliorini 等人^[12]也利用灰色 ICCD 和彩色数码相机分别测量预混燃烧火焰化学发光信号,通过对比与分析证实了彩色相机测量火焰当量比的可行性。

由于该方法设备要求低与操作便捷,已被广泛应用于实验燃烧诊断和工业燃烧监测中。但由于制造工艺的局限性,彩色相机图像传感器的光谱响应不尽相同,使得火焰实际光谱颜色在通过数字彩色相机采集与成像的过程中存在着着色偏影响,从而导致所得到的火焰图像颜色数据存在着相应的颜色误差,这严重影响了该方法的通用性。虽然 Yang 等人^[13]试图通过对成像过程建模,利用数值计算修正的方式减少成像过程造成的色差影响,但过程相对复杂。为了较便捷地提高彩色数字相机测量火焰当量比的准确性和通用性,本文提出了一种基于成像颜色快速白平衡校正的机器视觉测量甲烷预混火焰当量比的方法。

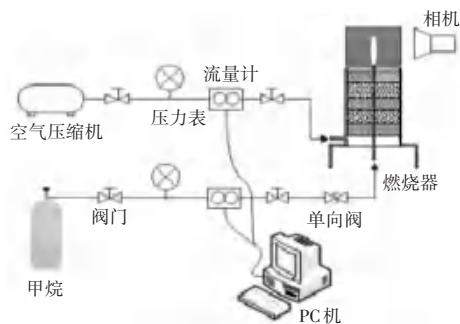
1 实验装置

1.1 燃烧平台

为了精确地获得实验样本数据,本实验采用了一套 6 mm 气路管道的燃烧实验平台,该平台包括燃烧器、两台气体质量流量计、一台空气压缩机、一瓶高纯度甲烷气体与一台作为气路控制器的 PC 机等。燃烧平台的结构示意如图 1 所示。

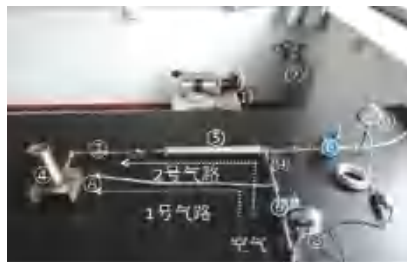
该燃烧平台集成了预混气路与非预混气路,其中 1 号气路为非预混气路,可产生扩散火焰,而 2 号气路则是用于产生预混火焰的预混气路,两者通过气路控制阀⑧、⑨来调配。实验中需要配比不同当量比的火焰样本,因此采用 2 号预混气路对点燃前

的甲烷气体与空气进行充分混合。



(a) 燃烧平台结构图

(a) Combustion platform structure drawing



① 空气压缩机; ② 甲烷; ③ 压力表; ④ 燃烧器; ⑤ 预混管;

⑥ 流量计; ⑦ 单向阀; ⑧、⑨ 气路控制阀

(b) 燃烧平台实物图

(b) Actual picture of burning platform

图 1 燃烧平台的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the combustion platform

实验中预混甲烷的当量比根据公式计算得到,其数学公式可表示为:

$$\Phi = \frac{\frac{\text{air}}{\text{CH}_4} \text{ stoic}}{\frac{\text{air}}{\text{CH}_4} \text{ real}} \quad (1)$$

其中, $\frac{\text{air}}{\text{CH}_4} \text{ stoic} \approx 17.117$ 。

为了便于计算,将甲烷燃料的值设定为 100 ml,然后根据所需要的火焰当量比值,通过公式(1)计算得到所需要供应的空气量。实验测试了 10 组不同当量比(0.75~1.2,间隔 0.05),各组空气流量值分别为 228.2 ml、214 ml、201.4 ml、190.2 ml、180.2 ml、171.2 ml、163 ml、155.6 ml、148.8 ml、142.6 ml。

1.2 光数据采集设备

本次实验采用尼康 D5000 作为光数据采集设备对火焰样本数据进行采集,相机相对火焰放置的位置如图 1(a)所示。聚光镜头采用 NIKON AF-S NIKKOR 18-70mm f3.5-4.5G ED DX。为了采集足够像素且清晰的火焰图像,在实际实验时焦距设置为 0.38 m,镜头距离燃烧器嘴管约 25 cm;为避免额

外光源干扰火焰化学发光成像,实验过程中还进行了避光处理。

1.3 标准色卡

由于成像颜色与采集环境(设备)具有一定关联性,即同一个火焰样本在不同的采集环境(设备)下可能得到的图像颜色不一致,因此需要引入标准色彩设备来进行成像颜色校正。本次实验采用的标准色彩校正设备为爱色 ColorChecker。该设备具有孟塞尔 24 色的标准色彩,色卡实物如图 2 所示:



图 2 标准校正色卡

Fig. 2 Standard correction color card

2 实验与分析

2.1 光圈、快门与 ISO 影响

理论上,在成像过程中,光圈大小、快门时间以及 ISO 都会对采集图像的像素值造成影响。光圈作用是调节相机镜头上孔径的大小,从而控制透过镜头的光通量,光圈越大、即 F 数值越小,进光量就越大。快门的作用是控制光闸开启状态的时间,开启的时间越长,相机采集的总进光量越多;而 ISO 则为相机的感光度,一般来说,ISO 感光度越大,相机对光线越敏感。为了探究以上参数是否会对成像色偏有影响,本文分别对光圈、快门与 ISO 进行了量化实验研究,结果如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,在恒定快门和 ISO 时,随着光圈设置的减小(即图像从左至右),三色图的色彩波峰在横坐标上并没有明显的位移,说明光圈的变化并不会使得成像采集的颜色发生改变,但是不同光圈下色彩的峰值在纵向上有所变化:随着光圈减小,峰值相应减小。因此,光圈不会造成色偏影响,仅仅影响光闸开度,从而使得采集光谱强度变化。

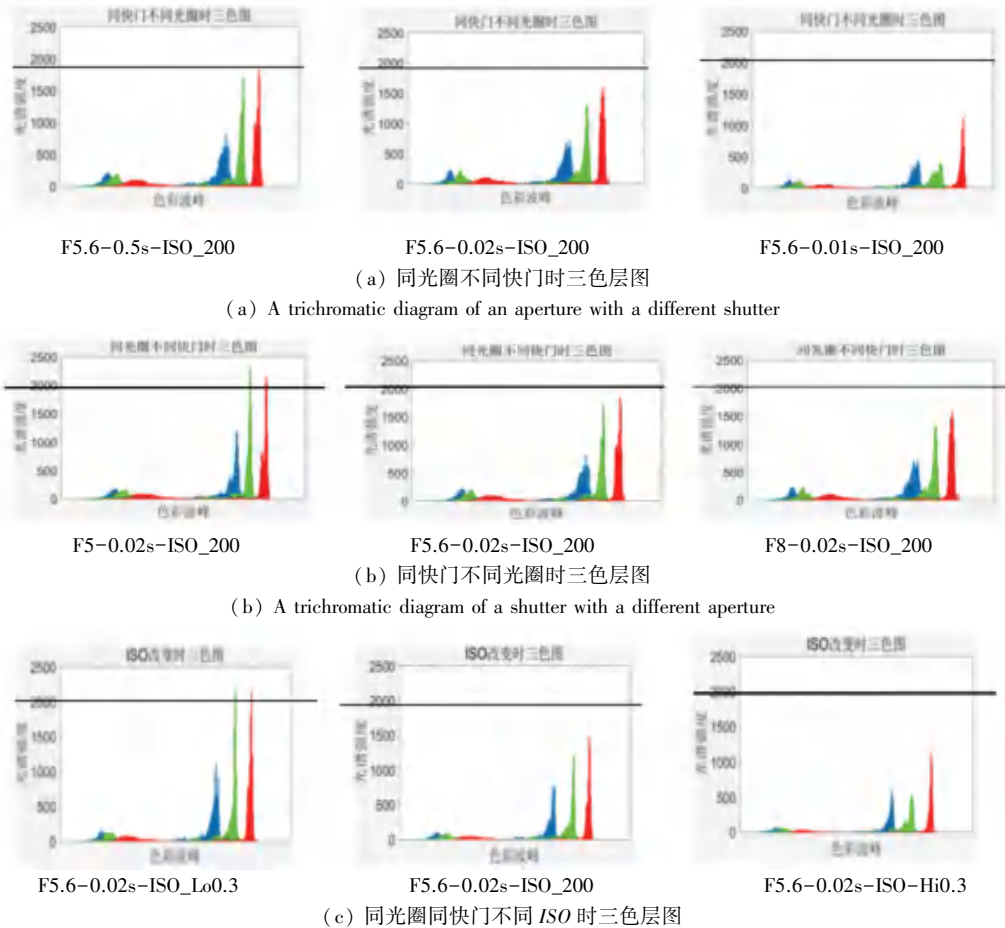


图 3 量化实验研究结果

Fig. 3 Quantitative experimental research results

在图3(b)的快门定量研究与图3(c)的ISO定量研究中,发现了与图3(a)类似结果,说明实验采集设备(尼康相机)在快门、光圈和ISO变化时,对于图像的三色层(R、G、B)颜色光谱的响应却未曾改变。换言之,快门、光圈和ISO的变化仅影响图像成像的亮度值,而不会影响到图像的颜色光谱。由此可知选择不同快门、光圈和ISO进行实验时,不会影响到后期实验成像颜色的结果。因此,仅为了让后续实验数据拥有合适的亮度,实验中成像设备参数设置为:光圈(F5.6),快门(0.02 s)和ISO(200)。

2.2 色偏影响

色偏现象^[14]是一种成像颜色与实际光谱颜色不符的现象。由于颜色特征是一种极不稳定的视觉特征,易受到光源的光谱能量分布、成像物体表面反射特性及采集设备的感光特性等影响,使得采集的图像颜色与标准光源下的颜色之间存在偏差。若定量研究图像光谱颜色时存在色偏现象,将会影响图像颜色的特征提取和分类等一系列后续处理的准确性。

由于火焰是自发光物体,利用彩色相机可直接采集火焰图像颜色,并不会受到照射光源和表面反射的影响,但是采集设备的感光特性依然无法忽视。因此,在利用彩色相机采集火焰颜色建模间接测量火焰当量比时,必须首先进行消除色偏影响的处理。

2.2.1 白平衡

常用的色彩校正方法是白平衡;白平衡^[15]本身就是一个抽象的概念,按照字面理解就是白色的平衡,是将在不同环境色温中的白色物体都还原成真的“白色”,目的是使得图像的成像颜色接近实际光谱颜色。因此,通过白平衡的校正处理,成像的基本色彩也将得到还原。

在传统利用彩色相机B/G图层测量火焰当量比中,研究者们并没有考虑图像色偏问题,就会使得实验结果出现一定的色彩成像误差。由此本文提出利用标准色卡作为参考标准,通过白平衡图像算法消除由成像过程中导致的色偏问题。

2.2.2 白平衡修正算法研究

目前,白平衡修正的算法有参考白点法^[16-17],肤色白平衡法^[18-19]等,这些方法是通过选取近白点或肤色点进行色温计算,但在图像中不含有白色或肤色内容时就会使得统计不准确;灰度世界算法^[20]不要求图像含有特定内容,适应性广泛;镜面白平衡^[21]又称完美反射法,是图像中的“镜面”,可以完

全发射光源照射在物体上面的光线,这样就可获得当前的色彩信息。

镜面白平衡算法中心思想就是假设图像上最亮点即为白点,并以此白点为参考来对图像进行白平衡调整,如[255, 255, 255]即为某一幅图的纯白像素点。处理的流程步骤为:

- (1)确定RGB三通道中的R、G、B的最大值: $R_{max}、G_{max}、B_{max}$ 。
- (2)求各个通道相对于所选定白光的偏移量,即:

$$\begin{cases} K_r = \frac{255}{R_{max}}; \\ K_g = \frac{255}{G_{max}}; \\ K_b = \frac{255}{B_{max}}. \end{cases} \quad (2)$$

- (3)对于图像中的每个像素,调整三分量,即:

$$\begin{cases} C(R') = C(R) * K_r; \\ C(G') = C(G) * K_g; \\ C(B') = C(B) * K_b. \end{cases} \quad (3)$$

而灰度世界算法,简称灰度算法,是以灰度世界假设为基础,其思想为对于一幅有着大量色彩变化的图像R、G、B三个分量的平均值趋于同一灰度值。故在研究处理时,各步骤可顺次阐述如下。

- (1)确定RGB三通道中的R、G、B平均值 $\bar{R}、\bar{G}、\bar{B}$ 。

- (2)确定灰度尺度Gray,即:

$$Gray = \frac{1}{3}(\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}), \quad (4)$$

- (3)计算三通道的增益系数,即:

$$\begin{cases} K_r = \frac{Gray}{\bar{R}}; \\ K_g = \frac{Gray}{\bar{G}}; \\ K_b = \frac{Gray}{\bar{B}}. \end{cases} \quad (5)$$

- (4)对于图像中的每个像素,调整三分量,即:

$$\begin{cases} C(R') = C(R) * K_r; \\ C(G') = C(G) * K_g; \\ C(B') = C(B) * K_b. \end{cases} \quad (6)$$

由灰度世界算法在对相机拍摄色卡所得的实验在未做白平衡调整时与白平衡修正后对比结果如图4所示。

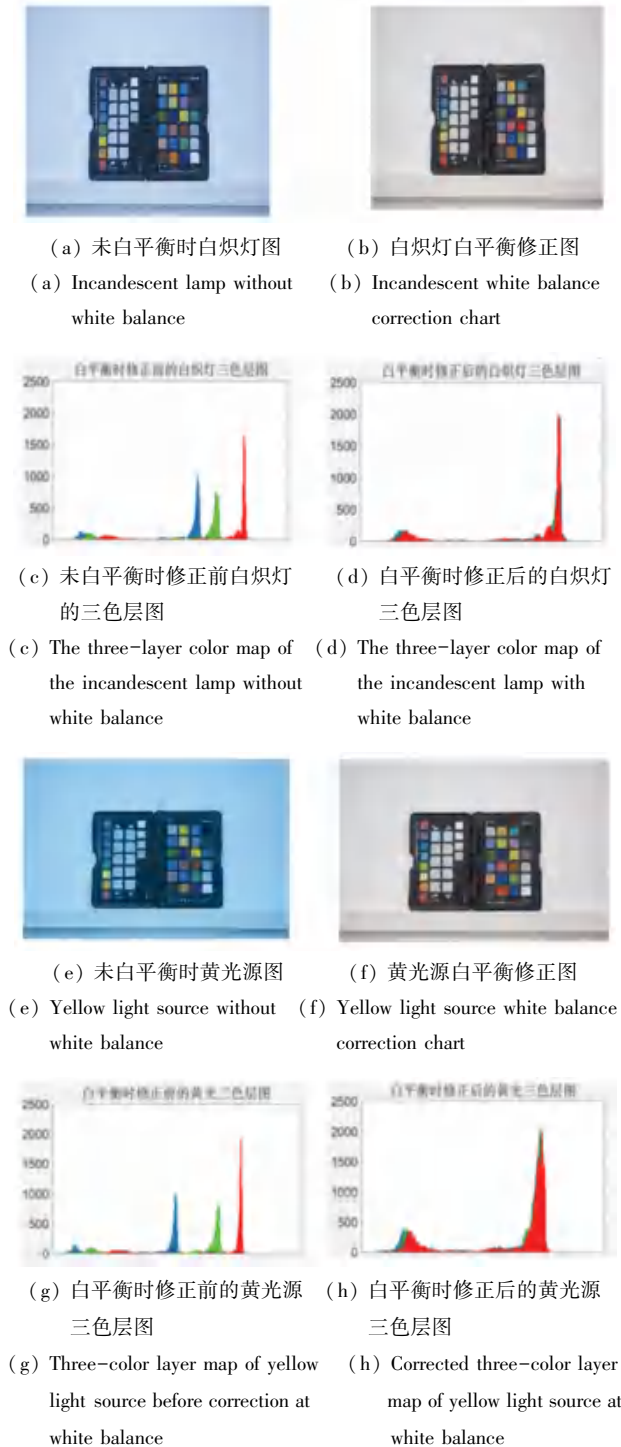


图4 未白平衡与白平衡后的实验效果对比图

Fig. 4 Comparison of experimental results without white balance and with white balance

由图4(a)可以看到在未白平衡的白炽灯模式下,该图整体呈现淡蓝色,而在图4(e)未白平衡的黄光源模式时的图像整体呈现蓝色;两者之间的颜

色偏差较大。由此说明在白平衡不同模式下,数字彩色相机在成像的过程确实存在着色偏问题。若未考虑色偏影响而做测试实验,则结果肯定会出现差错。对于图4(b)是对白炽灯模式下白平衡的修正图,图4(f)为黄光源白平衡修正,从这2幅图中可以明显看到,在进行白平衡修正后,色偏影响大大降低、甚至基本‘消失’了,说明了对白平衡进行修正是有必要的一个步骤;从图4(c)、图4(d)、图4(g)、图4(h)中发现,在修正前后三色层图中还会看到数据修正的偏移变化,这也充分体现了白平衡修正的必要性。

对火焰图像的修正前后对比图如图5所示。

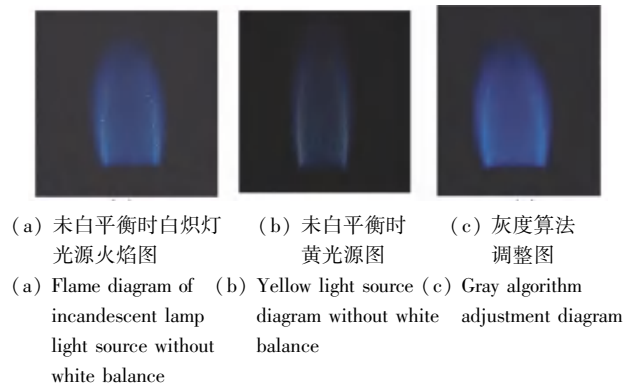


图5 白平衡修正算法在预混甲烷火焰的应用

Fig. 5 Application of white balance correction algorithm in premixed methane flame

图5(a)、图5(b)两张图虽是对同一物体进行拍摄,但在不同光源模式下得到的图像却有不同成像颜色,说明色偏的不同确实会影响预混甲烷火焰当量比的测量结果。而图5(c)图则是用灰度算法对图5(a)、图5(b)图像的白平衡修正结果。从图5(c)图中看到在利用该算法对图5(a)、图5(b)因色偏不同而进行白平衡修正后,得到的图像色彩有了很好的校正效果,由此说明该方法对预混甲烷火焰白平衡修正确实有效且可行。

2.3 预混火焰当量比测试结果

利用燃烧平台和采集设备组合,得到甲烷预混火焰当量比 Φ 从0.75~1.2的图像。在进行图像处理时,为了准确获取预混甲烷的蓝绿色火焰信息,首先通过DFCD技术^[22]对图像进行筛选处理,通过提取预混火焰蓝绿色颜色范围作为滤波层对原图火焰信号进行处理,以便去掉噪声等干扰信息;然后,利用算法对图像进行白平衡修正处理消除色偏影响;最后,提取图像中火焰区域的B图层与G图层的比值即B/G值,构建图像 $B/G-CH^*/C_2^*$ -火焰当量比模型。

利用 Matlab 软件处理实现以上建模过程,未进行白平衡和镜面白平衡,以及灰度白平衡处理后得到的结果如图 6 所示。

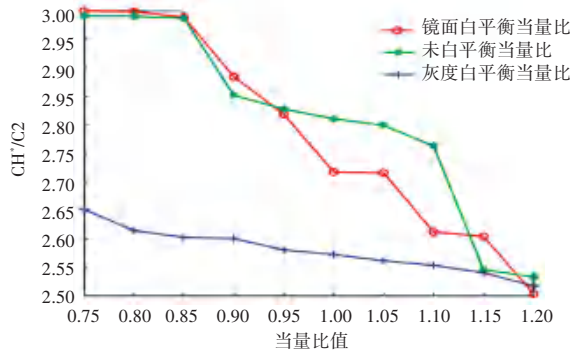


图 6 火焰图像在未白平衡以及不同白平衡修正后得到的模型

Fig. 6 Model of flame image after white balance and correction of different white balance

图 6 中的横坐标表示当量比,纵坐标为颜色模型 CH^*/C_2^* 比值,红线代表传统方法所得结果,绿线代表镜面白平衡算法得到的结果,蓝线代表灰度算法白平衡修正后得到的结果。从图 6 中看到,随着当量比数值的增加,3 种测量方式的颜色模型 CH^*/C_2^* 比值都呈现下降的趋势。在图 6 中镜面白平衡法所得的结果跟传统测量方式所得的结果的曲线走势大体相同,线性化程度稍微提高了点,但输入和输出之间线性化程度不高,即所得数据的波动性较大;而由灰度世界算法修正后所得的曲线虽然灵敏度有所下降,但输入和输出之间趋于线性化。造成的原因可能是在镜面白平衡算法中是以图中最亮的点作为白点参考点,这使得在对图像进行白平衡修正时参考点波动较大,从而影响实验结果的线性程度;而灰度算法是以图像三通道的平均值为白点参考点,让图像都趋于同一灰度值,从而使得实验结果的线性化程度大大提升。在测量中,一般希望模型线性度高,线性化程度越高,可用量程范围也相应越广,针对这一点上灰度算法的白平衡修正优于镜面法白平衡修正。

3 结束语

本文提出一种基于成像颜色校正的机器视觉测量甲烷预混火焰当量比方法。通过定量研究光圈、快门以及 ISO,发现这三个参数仅会对采集的光通量造成影响,并不会改变采集光的光谱信息,即不会影响成像颜色。通过颜色成像原理研究,发现造成火焰成像颜色色偏的影响因素为采集设备的传感器光谱响应。

本文随后对不同白平衡算法进行研究,通过对

比镜面白平衡算法和灰度世界算法,发现灰度世界算法对甲烷预混火焰成像的色彩校正具有良好的效果。通过对比传统的火焰当量比测量结果与白平衡修正后的结果,发现灰度世界算法可极大提高测量结果的线性性。该方法简单、易操作,具有很大的推广性。

参考文献

- [1] COLLINS S. Advanced flame monitor stake one on bustion contorl [J]. power, 1993(10):75.
- [2] 徐伟勇,余岳峰,孙江,等. 数字图像处理技术在火焰检测上的应用[J]. 中国电力,1994(10):41.
- [3] 刘训臣,李玉阳,周忠岳,等. 光谱法和取样分析法在燃烧诊断研究中的应用[J]. 实验流体力学,2016,30(1):43.
- [4] 曹子沛. 基于图像和改进算法的火焰燃烧稳定性判别方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [5] TURNS S R. 燃烧学导论:概念与应用[M]. 3 版. 姚强,李水清,王宇,译. 北京:清华大学出版社,2015.
- [6] ROMERO C, LI Xianchang, KEYVAN S, et al. Spectrometer-based combustion monitoring or flame stoichiometry and temperature control [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6):659.
- [7] ARIAS L, TORTES S, SBARBARO D, et al. On the spectral bands measurements for combustion monitoring [J]. Combustion and Flame, 2011, 158(3):423.
- [8] KOJIMA J, IKEDA Y, NAKAJIMA T. Spatially resolved measurement of OH^* , CH^* , and C_2^* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane/air premixed flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 28(2):1757.
- [9] 胡悦,谭建国,吕良. 甲烷-空气预混火焰中化学发光定量测量放热率的实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(5):1083.
- [10] HUANG Huawei, ZHANG Yang. Digital colour image processing based measurement of premixed CH_4 + air and C_2H_4 + air flame chemiluminescence [J]. Fuel, 2011, 90(1):48.
- [11] TRINDADE T P, SANCHES J M, FERNANDES E C. Digital color image processing technique applied to gas combustion diagnostics [C]//8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. Lisbon, Portugal: [s.n.], 2013:1.
- [12] MIGLIORINI F, MAFFI S, De LULIIS S, et al. Analysis of chemiluminescence measurements by grey-scale ICCD and colour digital cameras [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(5):055202.
- [13] YANG Jiansheng, MA Zhen, ZHANG Yang. Improved colour-modelled CH^* and C_2^* measurement using a digital colour camera [J]. Measurement, 2019, 141:235.
- [14] 卢尊兰. 基于颜色特征分析的色偏检测与校正算法研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [15] 宿晓慧. CIS 白平衡及对对比度增强研究与硬件验证[D]. 天津:天津大学,2010.
- [16] 张钰,姚素英,胡燕翔. 一种基于边缘检测的图像自动白平衡方法[J]. 光电子激光, 2008, 19(6):804.
- [17] WENG C C, CHEN H, FUH C S. A novel automatic white balance method for digital still cameras [C]//2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2005). Kobe, Japan: IEEE, 2005: 3801. (下转第 298 页)