

基于 CCD 的炉膛辐射能测量方法研究

刘 禾

(华北电力大学自动化系, 北京 102206)

摘 要: 提出了一种用 CCD 测量炉膛辐射能的方法和相应测量系统. 分析了基于 CCD 的辐射能测量机理, 建立了 CCD 摄像机输出电压与辐射能的测量模型. 由于测量模型的复杂性和非线性会阻碍测量方法的实际应用, 同时考虑 BP 神经网络具有逼近任意非线性函数的特性, 因此提出了采用 BP 神经网络作为辐射能测量模型. 试验表明: 该测量方法是可行的, 且测量方法具有较满意的测量精度.

关键词: CCD; 测量模型; 辐射能; 神经网络; 炉膛

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 05-0910-04

Research on Measurement of Radiant Energy of Furnace Based on CCD

LIU He

(Department of Automation, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A method that employed CCD to measure radiant energy of furnace was proposed and corresponding measurement system was developed. The mechanism of measuring radiant energy with CCD was analyzed. A measurement model describing relationship between output voltage of CCD video camera and radiant energy was established. As the complexity and nonlinearity of the model, that would hinder the method from being put to practical use, and taking account of BP neural network capability of approximating any nonlinear function, a method of using BP neural network as measuring radiant energy model was presented. Experiments show that the method is feasible and has satisfactory measurement precision.

Key words: charge coupled devices; measurement model; radiant energy; neural network; furnace

1 引言

炉膛辐射能与其它可测物理参数相比能快速地反映着燃烧状况, 因此对锅炉燃烧控制、燃烧监测与诊断来说是一个重要的燃烧状态参数^[1-3]. 但是专用辐射能测量设备昂贵, 因此寻找一种简便、廉价的, 且能满足工程应用要求的炉膛辐射能测量方法就显得尤为重要和具有实际意义. 近年随着 CCD (Charge Coupled Device, 电荷耦合器件) 快速发展以及低廉的价格, 使得用 CCD 测量炉膛辐射能成为可能. 本文从机理分析出发, 探讨 CCD 测量辐射能的基本原理, 建立了辐射能与 CCD 摄像机输出之间的测量模型. 由于测量模型的复杂性和非线性, 因此提出用人工神经网络作为辐射能的测量模型, 试验表明该测量方法是可行的, 且有较满意的测量精度. 该测量方法将在锅炉燃烧控制、燃烧状态监测及诊断方面有着广泛应用前景.

2 测量机理

图 1 为基于 CCD 的炉膛辐射能测量系统结构, 首

先由光学系统将炉膛辐射出来的能量汇聚并传输到摄像机的 CCD 靶面上, 由 CCD 摄像机完成光电转换, 即将辐射能量转换成相应的图像信号, 该图像信号经图像采集卡送入计算机, 在计算机中根据测量模型算出辐射能.



图 1 基于 CCD 的辐射能测量系统

CCD 成像是个光电转换过程, 在理想情况下, 面阵 CCD 中的某个 CCD 输出电流 I_c 与该其上的光照度 E_r 的关系为^[4]

$$I_c = K_e E_r t \quad (1)$$

式中 K_e 为转换系数, 它与 CCD 器件转换效率及电荷放大器放大倍数有关, t 为采样 CCD 的间隔时间, 与摄像机电子快门时间有关.

CCD 上的光照度 E_r 与辐照度 $E_e(\lambda)$ 关系^[5]

$$E_r = K_m \int_{\lambda_e}^{\lambda_h} f(\lambda) E_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

λ 为波长, K_m 为接受系数, $f(\lambda)$ 为 CCD 摄像机的光谱响应函数, λ_k 、 λ_l 分别为 CCD 摄像机最低和最高响应波长。

炉膛在波长 λ 上的辐射能量可用辐出度 $E(\lambda)$ 来衡量, 辐射能量通过空气等介质时, 部分能量被空气等介质吸收, 使透过空气等介质层后的能量减少, 其减少规律服从郎伯-贝尔定律, 因此辐照度 $E_e(\lambda)$ 与炉膛辐出度 $E(\lambda)$ 关系为^[6]

$$E_e(\lambda) = E(\lambda) e^{-KL} \quad (3)$$

其中 L 为 CCD 至炉膛距离, C 为介质浓度, K 为介质吸收系数。

由式(1)、(2)和(3)整理得:

$$I_c = K_i \int_{\lambda_k}^{\lambda_l} f(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

其中 $K_i = K_e K_m e^{-KL}$, 当摄像机光圈、快门和测量距离不变时, K_i 为定值。

在 CCD 摄像机中, 除了对 CCD 器件输出电流信号放大之外还进行了 γ 校正(一般 $\gamma = 0.45$, 图像显示要求)。因此摄像机的输出电压 V 与辐出度 $E(\lambda)$ 的关系为^[7]

$$V = K_V \left(\int_{\lambda_k}^{\lambda_l} f(\lambda) E(\lambda) d\lambda \right)^\gamma \quad (5)$$

式中: K_V 为摄像系统系数, 与 K_i 、 γ 有关。

为降低成本, 采用单片式彩色 CCD 摄像机测量, 其成像方式是在面阵 CCD 前加一个彩色滤色器阵列, 使得可以从单片 CCD 芯片中取出红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色光电转换信号, CCD 的 R、G、B 的光谱响应函数 $f_R(\lambda)$ 、 $f_G(\lambda)$ 和 $f_B(\lambda)$ 特性如图 2 所示^[8]。

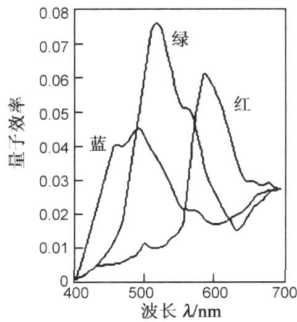


图 2 彩色 CCD 摄像机的光谱特性

因此由式(5)可知, 彩色 CCD 摄像机的 R、G、B 分量所对应的输出电压 V_R 、 V_G 和 V_B 与炉膛辐出度 $E(\lambda)$ 的关系为

$$V_I = K'_I \left(\int_{\lambda_k}^{\lambda_l} f_I(\lambda) E(\lambda) d\lambda \right)^\gamma \quad (6)$$

式中下标 I 分别取 R、G、B, K'_I 相应色度通道的系统系数, 其取决于通道放大系数、镜头光圈、快门时间和测量距离。

从图 2 看出, 设三基色光谱响应函数 $f_R(\lambda)$ 、 $f_G(\lambda)$ 和 $f_B(\lambda)$ 可近似为一窄带滤波函数, 于是根据积分中值定理, 由式(6)整理可得辐出度 $E(\lambda)$ 与彩色 CCD 摄像

机 R、G、B 分量输出电压之间关系的另一种形式:

$$E_{\lambda_I} = K_I \sqrt[\gamma]{V_I} \quad (7)$$

式中 I 分别取 R、G、B, λ_I 为 $f_I(\lambda)$ 的等效波长, E_{λ_I} 为等效波长 λ_I 所对应的辐出度, $K_I = \left[\sqrt[\gamma]{K'_I f_I(\lambda_I) \Delta \lambda} \right]^{-1}$, $\Delta \lambda$ 为 I 色滤波片的等效带宽。

在锅炉控制、监测和诊断中要用的炉膛辐射能量信号是辐出度 E_o , 它与辐出度 $E(\lambda)$ 和绝对温度 T 关系为^[6]

$$E_o = \int_0^\infty E(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (8)$$

E_o 表示了炉膛所有波长下的总辐射能量, 其值反映着炉膛燃烧状况。ε 为物体的辐射率, σ 为波尔兹曼常数。

当炉温小于 3000K 时, 维恩定律给出了温度 T 与相应波长的辐出度关系^[6], 于是由式(7)可得:

$$K_I \sqrt[\gamma]{V_I} = \varepsilon(\lambda_I, T) C_1 \lambda_I^{-5} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_I T} \right] \quad (9)$$

式中 C_1 、 C_2 分别为第一辐射常数和第二辐射常数, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为物体波长 λ 处的辐射系数, 其与温度有关。

由式(9)展开, 整理可得:

$$T = \frac{\gamma C_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)}{\ln \frac{V_R V_B}{(V_G)^2} + \gamma \left[5 \ln \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G^2} + \ln \frac{K_R K_B}{K_G^2} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_R, T) \varepsilon(\lambda_B, T)}{\varepsilon(\lambda_G, T)^2} \right]} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)得:

$$E_o = \sigma \varepsilon \left[\frac{\gamma C_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)}{\ln \frac{V_R V_B}{(V_G)^2} + \gamma \left[5 \ln \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G^2} + \ln \frac{K_R K_B}{K_G^2} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_R, T) \varepsilon(\lambda_B, T)}{\varepsilon(\lambda_G, T)^2} \right]} \right]^4 \quad (11)$$

式(11)揭示了辐出度 E_o 与彩色 CCD 摄像机的 R、G、B 分量输出电压 V_G 、 V_G 、 V_B 的关系, 它是一个在理想条件下推导出的辐射能测量模型, CCD 摄像机输出电压 V_R 、 V_G 和 V_B 经过图像采样后与数字图像 R、G、B 值成线性关系, 因此式(11)也间接表示着图像 R、G、B 值与炉膛辐出度 E_o 的理想关系。

3 测量模型

在模型推导过程中, 由于设置了一些假设条件, 才得到可表述测量机理和测量可行性的式(11)这个解析式。在实际应用中, 情况要复杂的多, 因此图像 R、G、B 值与炉膛辐出度 E_o 的实际函数关系将比式(11)非常复杂的多, 难以用解析式表达出来, 因此基于精确数学模型的软测量算法在这里就显得无能为力。

BP 神经网络具有逼近任意有界非线性函数的能

力, 可以通过神经网络对测量样本学习, 获得一个能确定 R 、 G 、 B 与 E_o 关系的神经网络测量模型. 这样通过图像 R 、 G 、 B 值便可以得到炉膛辐出度 E_o . 因此, 本文选用结构如图 3 所示的 BP 神经网络作为辐出度 E_o 测量模型, 网络的输入和输出都做了归一化处理, 网络的三个输入值为 $x_1 = R/R_{\max}$, $x_2 = G/G_{\max}$, $x_3 = B/B_{\max}$, 输出为 $y = E_o/E_{\max}$, $R_{\max}$ 、 $G_{\max}$ 、 $B_{\max}$ 、 $E_{\max}$ 为各自变量的最大值. 而隐含层的神经元数将通过试验来确定.

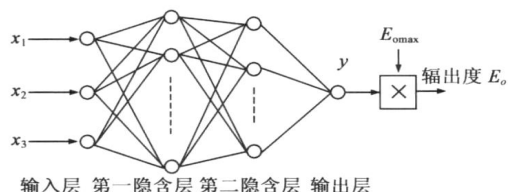


图 3 神经网络测量模型结构

设 x_j^1 为第一隐含层第 j 个神经元的输出, x_k^2 为第二隐含层第 k 个神经元的输出, 网络输出 y 与输入 $X = (x_1, x_2, x_3)$ 的关系如下:

$$\begin{cases} x_j^1 = f\left(\sum_{i=1}^3 w_{ji}^1 x_i - \theta_j^1\right), j = 1, \dots, n_1 \\ x_k^2 = f\left(\sum_{j=1}^{n_1} w_{jk}^2 x_j^1 - \theta_k^2\right), k = 1, \dots, n_2 \\ y = f\left(\sum_{k=1}^{n_2} w_k^3 x_k^2 - \theta^3\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f(\cdot)$ 为转移函数; n_1 、 n_2 为第一、二隐含层神经元数; w_{ji}^1 为输入层第 i 输入到第一隐含层第 j 个神经元的连接权; w_{jk}^2 为第一隐含层第 j 个神经元输出到第二隐含层第 k 个神经元的连接权; w_k^3 为第二隐含层第 k 个神经元输出到输出层神经元的连接权; θ_j^1 、 θ_k^2 和 θ^3 为相应神经元阈值.

在网络结构确定的条件下, 选择适当的测量数据作为学习样本对网络进行训练. 通过调整网络的连接权和阈值, 逼近图像 R 、 G 、 B 值与炉膛辐出度 E_o 之间的关系, 建立起被测参数 E_o 的测量模型, 即 $E_o = f(R, G, B)$, 从而实现对存在隐含、非解析和非线性关系的被测参数与测量参数之间的软测量.

4 试验

辐射能测量系统如图 1 示, 其中 CCD 摄像机为 WV-CP230 彩色工业摄像机, 图像采集由 OK-C30 彩色视频采集卡完成, 计算机为研华工控机.

首先对测量模型进行标定, 即神经网络训练. 由式 (8) 可知试验中控制了温度, 也就控制了辐出度 E_o . 因此为了便于标定, 选易控温的电炉为辐射能发出对象. 用标准热电偶测量相应温度 T . 由温度 T 通过式 (8) 得到炉膛辐出度 E_o (根据炉壁材料, ϵ 取 0.8), 其值归一

处理后作为辐射图像 R 、 G 、 B 值所对应的网络输出教师值 y_i .

试验过程为: (1) 调整电炉输入电压, 使其温度改变, 用热电偶测量电炉温度变化; (2) 当测量的热电势不变化时, 说明电炉达到了稳态平衡, 将这个时刻的炉内辐射图像用 CCD 摄像机拍摄下来. 由此获取了 18 幅不同温度的辐射图像和相应辐出度作为网络学习样本, 图 4 为其中一幅辐射图像.

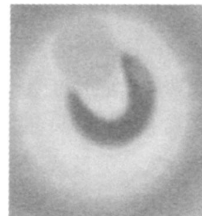


图 4 辐射图像

神经网络性能函数定义为

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_i(k) - y(k))^2 \quad (13)$$

其中: $y(k)$ 为网络输出值, $y_i(k)$ 为辐出度教师值, N 为学习样本数.

为了加快网络训练的收敛速度以及避免出现局部最小问题, 选用动量梯度下降训练方法, 其第 k 次循环中的权值和阈值改变量为

$$\Delta w^l(k+1) = -\alpha_k g_w(k) + mc \cdot \Delta w^l(k-1) \quad (14)$$

$$\Delta \theta^l(k+1) = -\alpha_k g_\theta(k) + mc \cdot \Delta \theta^l(k-1) \quad (15)$$

其中, $l = 1, 2, 3$, $g_w(k)$ 、 $g_\theta(k)$ 表示当前性能函数对权值和阈值的梯度, α_k 是学习率, mc 是动量系数, $0 \leq mc \leq 1$.

网络的转移函数均采用双曲正切函数, 隐含层神经元数的确定方法是: 在满足学习精度的前提下, 改变各隐含层的神经元数以减少网络的学习次数. 笔者从 3-6-2-1 结构 (注: 3 为输入向量数; 6 为第一隐含层神经元数; 2 为第二隐含层神经元数; 1 为输出层神经元数) 到 3-9-9-1 结构共训练了 26 种不同的网络, 表 1 是部分训练结果比较好的网络, 从表 1 中可以看出, 结构为 3-8-8-1 的网络较其他结构网络的训练次数要少, 其对样本学习情况如图 5 示, 其对单个样本最大相对误差小于 4.3%.

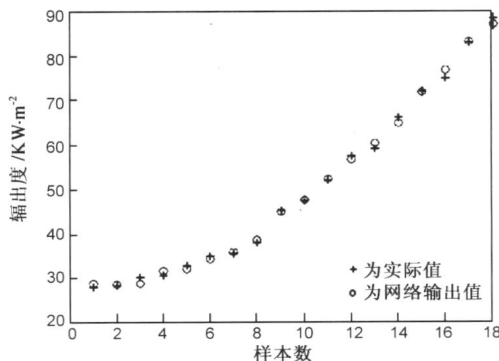


图 5 样本学习情况

图 6 为 3-8-8-1 结构网络测量输出与教师值的相关性分析图, 可看出它们具有很好的相关性, 于是选

3- 8- 8- 1 结构的网络作为辐出度测量模型, 用该模型对 30 个不同炉温下(非学习样本)的辐射图像进行测量, 其测量的最大相对误差不超过 4. 5%, 该测量精度满足将辐出度 E_o 作为前馈信号引入到锅炉燃烧控制系统中的精度要求。

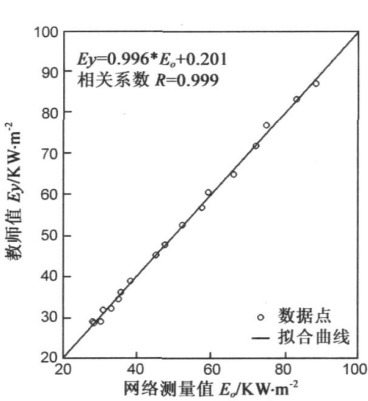


图 6 网络测量相关性

表 1 不同结构神经网络的学习情况($mse = 10^{-4}$)

网络结构	实验次数				
	1	2	3	4	5
3- 6- 5- 1	—	15306	8628	19993	—
3- 7- 3- 1	—	—	10476	14272	16172
3- 8- 5- 1	—	11550	15114	—	—
3- 8- 6- 1	—	15491	—	14301	10557
3- 8- 8- 1	4857	10624	9452	4171	8943
3- 9- 5- 1	—	17518	—	7918	14865
3- 9- 6- 1	5773	—	18973	—	—
3- 9- 7- 1	18973	12446	7460	6292	—
3- 9- 8- 1	10978	—	—	—	4947

注: —表示不能收敛或学习次数大于 20000 次仍未收敛

5 结束语

分析了 CCD 测量辐射能机理, 建立了辐射能测量模型, 这为其测量应用提供了理论依据. 由于测量模型的复杂性和非线性, 因此提出用 BP 神经网络来逼近该模型, 从而实现由测量辐射图像 R 、 G 、 B 值到辐出度的计算. 试验验证了用 CCD 摄像机和 BP 神经网络进行辐射能测量的可行性, 测量成本低是本测量方法特点, 虽然测量精度能满足工程应用, 但进一步提高测量精度是今后一个重点研究方向。

参考文献:

[1] 张师帅, 周怀春, 黄勇理, 等. 采用辐射能反馈信号的火电单元机组负荷控制系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 85- 88.
Zhang shuai, Zhou Huaichun, Huang Yongli, et al. Simulation

on a Load control system of thermal power units based on the feedback signal of radiant energy[J]. Proceeding of the CSEE, 2001, 21(2): 85- 88 . (in Chinese)
[2] 马涛, 徐向东, 王鑫鑫. 基于辐射能信号的锅炉燃烧调节系统研究[J]. 电站系统工程, 2004, 20(1): 52- 54.
MA Tao, XU Xiang dong, WANG Xin xin. Research of an ad-justive system of boiler combustion based on the radiant energy [J], Power System Engineering, 2004, 20(1): 52- 54. (in Chinese)
[3] Miles J I, Hamaber R G, et al. Analysis of thermal radiation in coafired furnaces[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3056: 20- 32.
[4] 王庆有, 孙为珠. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993. 10- 30.
Wang Qinyou, Shun Weizhu, CCD Applied Technique[M]. Tianjin: Tianjin University Press. 1993: 10- 30. (in Chinese)
[5] 张晓舟, 郭烨华, 郑克哲. 面阵 CCD 用于目标亮度的测量[J]. 应用光学, 1995, 16(2): 45- 47.
Zhang Xiaozhou, Guo Yebo, Zheng Kezhe. Plane array CCD for measurement of target brightness[J]. Journal of Applied Optics, 1995, 16(2): 45- 47. (in Chinese)
[6] 朱德忠. 热物理测量技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 250- 290.
Zhu Dezhong. Thermophysics Measuring Technique[M]. Bei-jing: Tsinghua University Press, 1990. 250- 290. (in Chinese)
[7] 刘禾. 数字图像处理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 277- 287.
Liu He. Digital Image Processing and its Application[M]. Bei-jing: China Electric Power Press, 2006. 277- 287. (in Chinese)
[8] 杨磊, 李峰. 闭路电视监控系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 110- 160.
Yang Lei, Li feng. Closed Circuit Television Supervision Sys-tem[M]. Beijing: Mechanical industry Press, 2001. 110 - 160. (in Chinese)

作者简介:



刘 禾 男, 1961 年, 博士, 教授. 主要研究
方向: 检测技术、图像处理、过程控制.
E-mail: liuhe99@ sina. com; liuhe99@ yahoo. com. cn