

文章编号: 1672-8785(2015)07-0016-05

# 回转窑筒体表面三维热图像生成方法研究

陈桂芳 申 娇

(重庆邮电大学信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 水泥回转窑是新型干法水泥生产流程中的核心设备。窑筒体的表面温度可以综合反映窑内状况, 因此对回转窑筒体的表面温度进行实时监测是保障回转窑安全运行的重要手段。为了有效表达温度分布状况, 对回转窑筒体表面温度的三维热图像生成方法进行了研究。采用灰度级-伪彩色映射模型将不同温度映射成了不同颜色, 并创新性地通过结合 OpenGL 技术实现了三维热图像颇具真实感的实时呈现。现场测试结果表明, 基于此方法生成的回转窑筒体表面的三维热图像具有表达直观、运行稳定可靠等特点。

**关键词:** 回转窑筒体; 灰度伪彩; OpenGL ; 三维热图像

**中图分类号:** TH17 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.07.004

## Research on Three-dimensional Thermograph Generation Method of Rotary Kiln Surface

CHEN Gui-fang, SHEN Jiao

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** A rotary cement kiln is the core equipment in the production process of dry cement. The surface temperature of a rotary kiln can reflect the internal status of the rotary kiln. Therefore, to monitor the surface temperature of the rotary kiln in real time is very important for keeping the safe operation of the rotary kiln. To express the temperature distribution of the rotary kiln effectively, the three-dimensional thermograph generation of the surface temperature of the rotary kiln is studied. A pseudo-gray color coding model is used to map different temperatures into different colors. By incorporating an OpenGL technology creatively, realistic three-dimensional thermographs are displayed in real time. The in-situ test results show that the three-dimensional thermographs of the rotary kiln surface generated have the features of intuition, stability and reliability.

**Key words:** rotary kiln; pseudo-gray; OpenGL; three-dimension thermograph

## 0 引言

水泥回转窑是新型干法水泥生产过程中最为重要的一种工艺设备。回转窑内热力过程的好坏直接影响着水泥熟料的产量和质量, 因此

回转窑的工作性能与运行状态将会直接影响有关企业的生产能力和经济效益。通过对回转窑表面温度进行实时、连续的测量以及对监测数据进行图形化显示, 可以使回转窑的操作人员

收稿日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61275099); 重庆邮电大学文峰创新创业基金 (cxjj2014003)

作者简介: 陈桂芳 (1991-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和红外热成像技术。

E-mail: bramely@163.com

准确获知窑皮均匀状况、结圈情况、窑衬脱落位置和热斑范围等诸多重要信息,帮助他们有效改善对回转窑的操作,提高回转窑运行的经济性<sup>[1-3]</sup>。

三维热图像的作用是以三维图像的形式将回转窑筒体扫描区域中所有监测点的温度信息展示给窑筒体的监控人员。现有的研究及产品大多采用 Labview 或 MSCHART 对数据进行处理<sup>[4]</sup>,其图像的视觉显示效果差,刷新速度慢。本文提出了一种高分辨率颜色模型,并创新性地通过结合专业 3D 图形接口 OpenGL 技术<sup>[5]</sup>成功实现了回转窑表面三维热图像的真实呈现。

## 1 窑筒体表面红外测温系统的构成

该系统由筒体扫描仪和上位机软件两部分组成,其总体构成见图 1。其中,筒体扫描仪用于实现数据采集和控制功能,它由单元探测器和 DSP 控制模块构成。DSP 控制处理模块是本系统的核心,其主要作用是对经红外探头转换后的数字信号进行处理,然后通过传输模块将其发送给上位机软件进行实时显示<sup>[6]</sup>。

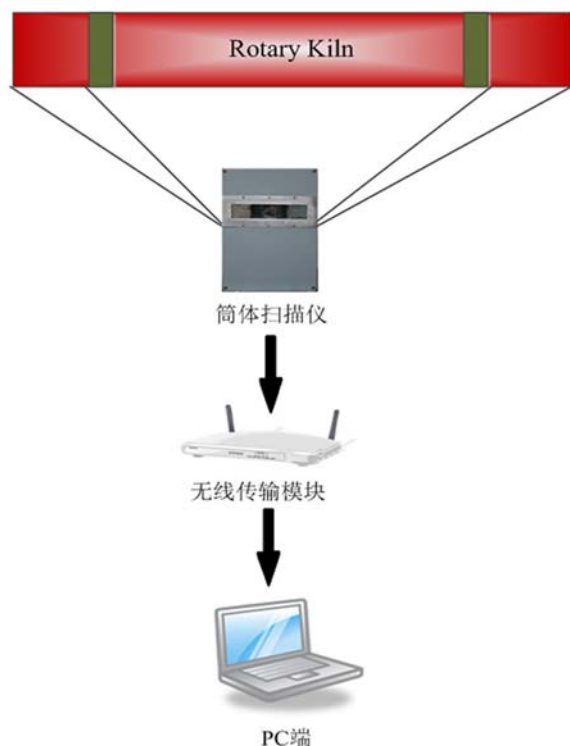


图 1 窑筒体表面红外测温系统的构成

上位机软件用于实现基础用户设置、实时数据显示、历史数据存储以及超温报警等功能。其中,实时显示的数据包括轴向温度分布曲线、扫描区域的二维及三维热图像。扫描区域的轴向温度分布曲线用于观察圆周轴线上各点的温度分布情况;二维热图像用于显示扫描区域内所有温度点的位置及温度情况,并以平面图的形式展示给用户;三维热图像用于以三维立体图像的方式将扫描区域内所有温度点的位置及具体情况展示给用户,与二维平面图相比,其显示更加直观,也更容易被用户接受和辨识。从实际效果来看,用户也更倾向于使用三维热图像来观察扫描区域的温度变化情况。

## 2 三维热图像的生成方法

### 2.1 生成三维热图像的原理及过程

为了实现一幅完整的三维热图像,需要获得反映各采集点温度的三维坐标值以及表示不同温度的颜色值。首先,根据回转窑筒体扫描仪所传回的温度值,计算温度相对于参照温度基值的差值,然后将其转换成图形相对于三维原点平面的高度。通过将各点高度标记到坐标轴中的相应位置,可以生成反映回转窑表面温度的三维轮廓图。在笛卡尔坐标系中,本文用  $x$  轴数据表示回转窑炉的长度,用  $y$  轴数据表示对应点的温度高低,用  $z$  轴数据表示回转窑剖面的展开周长。然后通过用不同颜色标记各种高度的方式,根据回转窑表面上各温度监测点的位置坐标,将相应的颜色值标记在三维轮廓中。这样就能生成一幅完整的反映回转窑表面温度的三维热图像。

生成三维热图像的数据处理过程如下:

- (1) 根据协议接收前端传回的表示温度的数据,并将其解析为用作显示的格式;
- (2) 结合扫描点的位置,将不同监测点的温度值解析为三维坐标值;
- (3) 将不同温度值解析为不同的颜色值;
- (4) 将监测点的三维坐标及颜色描绘到一幅图像中。

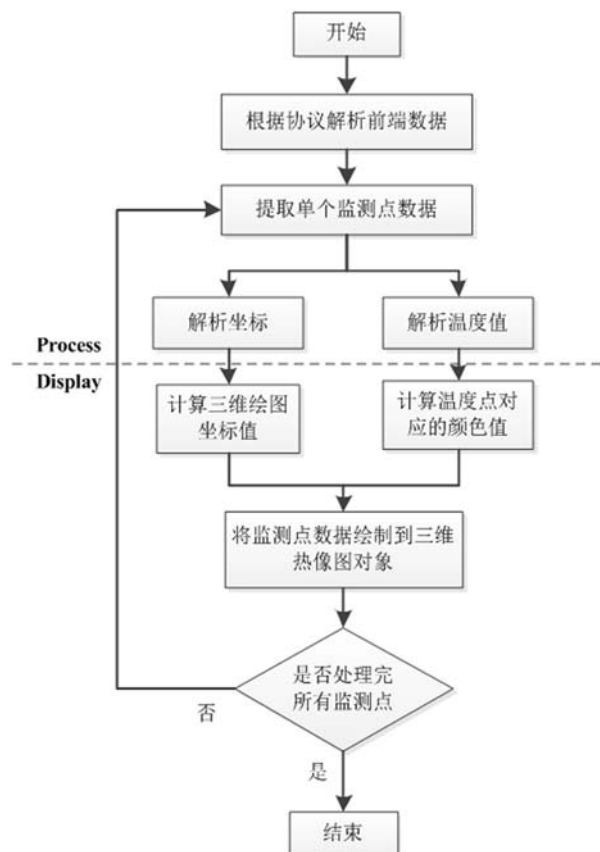


图 2 生成三维热像图的数据处理过程

图 2 所示为生成三维热图像的数据处理过程。

## 2.2 灰度 - 伪彩模型

经扫描仪传回的红外图像为黑白灰度图像,其灰度值的动态范围不大。由于人眼只能区分数十种灰度变化,我们很难从这些灰度级中了解到回转窑表面的温度情况。而人眼对彩色变化远比对灰度变化敏感,且对彩色的分辨率可达数百种甚至上千种<sup>[7-8]</sup>,因此对灰度图像进行伪彩色变换是一种非常有效的图像增强方法。用不同的彩色来表达温度将会使得对回转窑表面温度的监控变得更加直观、形象。

由红外窑筒体扫描仪监测得到的数据经处理后,被以 0 ~ 255 范围内的灰度值形式上传到 PC 端。然后 PC 端通过相应的数学模型将灰度数值映射至 100 ~ 500 °C 温度范围内的具体温度值。因此,温度 - 颜色映射模型可对应于灰度 - 伪彩色模型。

由于传统的灰度级伪彩色变换是将图像分为低温(蓝色)、中低温(绿色)、中温(黄色)和高温(红色)四个部分,各区域的灰度范围取值固定。但是水泥回转窑在燃烧过程中的温度范围波动不大,若采用传统的灰度级伪彩色变换方法,将会导致所获得的热图像呈现一片色,使得无法有效区分温度的具体数值。因此,为了明显区分回转窑是否正常运转以及回转窑温度超温的各点温度显示效果,并迎合窑筒体监控人员的视觉习惯,我们对传统的灰度级伪彩色变换方法进行了改进,细化了灰度范围,设计了 3 种灰度 - 彩色映射模型以供操作人员自由选择。根据现场的实际应用需求,本文着重对第一种变换方式进行阐述。此种变换方式将灰度级划分为 6 个部分,分别对应于 0 ~ 41 (蓝色)、41 ~ 84 (蓝绿色)、84 ~ 127 (黄绿色)、127 ~ 170 (橘红色)、170 ~ 213 (红色) 和 213 ~ 255 (玫红色)。这种变换方式的变换函数如下:

$$R = \begin{cases} 0, & 0 \leq g < 84 \\ 5.7955 \times (g - 84), & 84 \leq g < 127 \\ 255, & 128 \leq g \leq 255 \end{cases} \quad (1)$$

$$G = \begin{cases} 3.0357 \times g, & 0 \leq g < 41 \\ 3.0357 \times g, & 41 \leq g < 84 \\ 255, & 84 \leq g < 127 \\ 255 - 5.9302 \times (g - 127), & 127 \leq g < 170 \\ 0, & 170 \leq g < 213 \\ 6.0714 \times (g - 213), & 213 \leq g \leq 255 \end{cases} \quad (2)$$

$$B = \begin{cases} 255 - 3.0357 \times g, & 0 \leq g \leq 83 \\ 0, & 84 \leq g \leq 170 \\ 5.9302 \times (g - 170), & 171 \leq g \leq 213 \\ 255, & 214 \leq g \leq 255 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $g$  表示灰度值;  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别表示红、绿、蓝三种颜色分量。

## 2.3 图形绘制

OpenGL 是国际上公认的 3D 图形工业标准,它具有跨平台、移植性好等优点。OpenGL 可提供绘制点、线、三角形、四边形等图元绘制

接口函数以及顶点渲染函数,能够为本研究提供便捷的三维图形绘制及着色处理服务。

由于本文数据模型中的数据量较大,直接进行绘制会大大降低整体显示的效率,所以需要通过数据变换处理将坐标数据变换成具有合适的数值大小。为此,我们采用归一化变换算法,即用原始数据减去该方向上的最小值后再将其乘以一个比例系数,具体变换如下:

$$X = (X_{source} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (4)$$

$$Y = (Y_{source} - Y_{min}) / (Y_{max} - Y_{min}) \quad (5)$$

$$Z = (Z_{source} - Z_{min}) / (Z_{max} - Z_{min}) \quad (6)$$

式中,  $X_{source}$ 、 $Y_{source}$ 、 $Z_{source}$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标的原始值;  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标变换后的值。

网格模型是一种简单模型。利用它可以看出回转窑表面温度数据的三维轮廓,再加上温度-颜色映射,就能获得反映真实温度且便于观察的三维热图像。

实现过程简单如下:调用 OpenGL 标准库函数  $glBegin()$  和  $glEnd()$ ,采用矩形图元装配方式绘制一行三维数据,并在对应不同高度的顶点位置上采用顶点着色的方法,将每个顶点的颜色值绑定。然后通过循环绘制沿回转窑轴向扫描的每行数据,形成窑剖面展开的三维温度网格模型,从而获得反映整个窑剖面展开温度的三维热图像。

### 3 现场测试结果

采用西南水泥有限公司旗下广安及秀山生产线的实际生产数据对本文方法进行了测试,得到了本研究的实际应用效果。图3所示为监测现场处于正常运行状态下的水泥回转窑。图4所示为回转窑的轴向温度变化曲线,其中横坐标  $x$  表示回转窑的长度位置,纵坐标  $y$  表示窑表面温度的监测范围。图5为现场测试时反映回转窑表面温度的二维热图像。图6为反映回转窑表面温度的三维热图像,其实时显示流畅,逼



图3 回转窑筒体

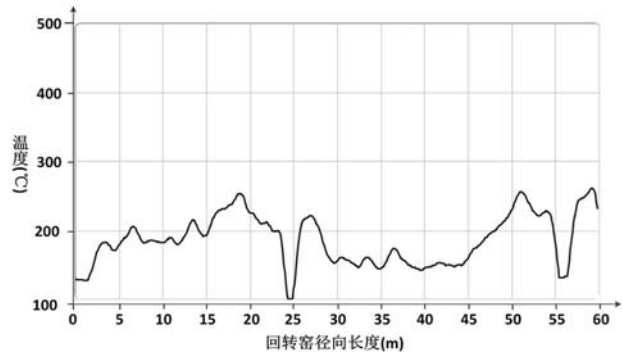


图4 现场温度曲线

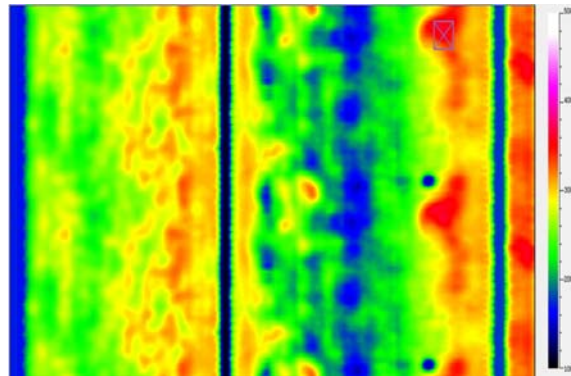


图5 现场运行时显示的二维热图像

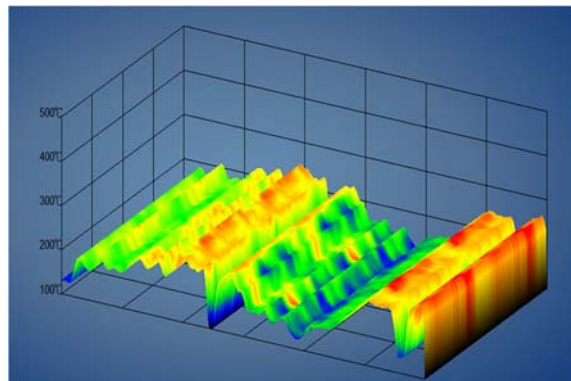


图6 现场运行时显示的三维热图像

真感很强。通过图 5 和图 6 均能明显观察到, 图像靠右边是窑头部分, 根据颜色参照图可知, 窑头温度在 300 ℃ 左右; 图像靠左边是回转窑的窑尾部分, 根据颜色对照可知, 其温度在 150 ℃ 左右。此时, 回转窑处于正常运转状态。

与图 5 相比, 图 6 通过高度数据更加明显地表达出了回转窑在正常燃烧时窑头温度高于窑尾温度的事实, 同时还直观地反映出了最高温点所在的位置。通过这种三维热图像, 操作人员便能方便地对水泥回转窑的燃烧状态进行观察并及时对其非正常现象作出反应。

#### 4 结束语

根据红外窑筒体温度监测的实际要求, 提出了一种基于 OpenGL 的三维热图像绘制模型。这种三维热图像显示软件已成功应用于西南水泥有限公司多条水泥线的回转窑工作现场。测试及运行结果表明, 该模型有效地实现了回转窑表面温度的三维热图像显示, 具有显示效果形象直观、运行稳定可靠等优点, 为回转窑的安全运行提供了一种可靠的监测手段。

#### 参考文献

- [1] Zhang L, Gao X W. Survey on Rotary Kiln Process Control [C]. Guilin: 21st Annual International Conference on Chinese Control and Decision, 2009.
- [2] Li W, Wang D, Chai T. Burning State Recognition of Rotary Kiln Using ELMs with Heterogeneous Features [J]. *Neurocomputing*, 2013, **102**: 144–153.
- [3] 周显, 郑凯, 张云, 等. 回转窑筒体表面形变的三维可视化技术研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, **35**(4): 126–129.
- [4] 刘强. 基于红外测温的水泥回转窑状态监测系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [5] Tsoukalos M. An Introduction to OpenGL Programming [J]. *Linux Journal*, 2014, **244**: 2–16.
- [6] 王斐, 刘琴. 基于红外测温技术的窑筒体温度数据采集系统的设计 [J]. *红外*, 2014, **35**(4): 45–48.
- [7] Liu C L, Tan L X, Li C Y, et al. Pseudo-color Coding and Processing for Infrared Images [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **5**: 17–19.
- [8] Wang T, Su J, Huang Y, et al. Study of the Pseudo-color Processing for Infrared Forest-fire Image [C]. Wuhan: 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC), 2010.

(上接第 5 页)

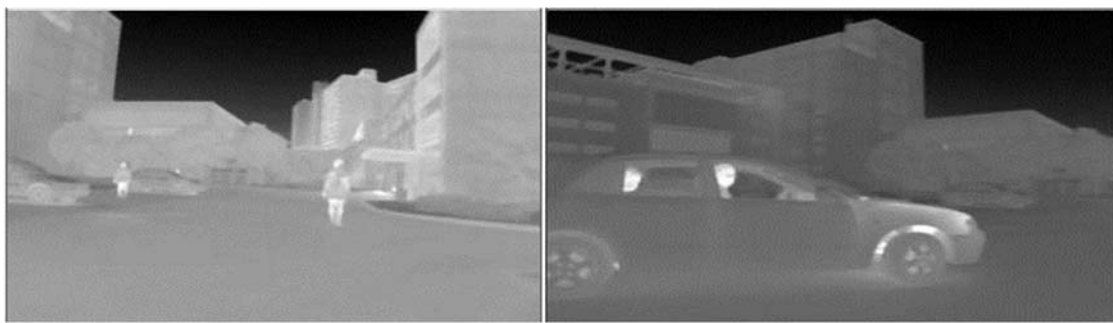


图 8 用 PC 控制 FPGA 系统时的室外取景图

案能够弥补普通可见光与红外灯夜视技术的不足, 具有设计小型化、成本低、功耗小、性能稳定等特点, 因此能广泛应用于安防夜视领域, 并可实现远程交互控制。

#### 参考文献

- [1] 周栋, 史贵连, 李凯扬. 基于以太网的红外热像仪研究与设计 [J]. *半导体光电*, 2013, **34**(6): 1060–1062.
- [2] 王保云. 物联网技术研究综述 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, **23**(12): 1–7.
- [3] 侯丰山. 物联网技术与应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [4] 唐艳荣. 基于 GPRS 的汽车控制关键技术研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [5] 刘云浩. *物联网导论* [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 王忆锋. 2013 年的中国红外技术 (中) [J]. *红外技术*, 2014, **36**(2): 89–101.