

文章编号: 1672-8785(2018)02-0034-05

## 基于回转窑表面温度场的红外三维 图像重建算法研究

程亚军 谭 伟

(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:** 回转窑是工业生产中熟料煅烧的核心设备, 生产过程中需要对其进行实时监测, 防止温度过高引发事故。现代工业采用红外测温方法实时监测回转窑的表面温度, 在监测过程中需要进行实时故障定位。传统方法对回转窑实时监测时, 普遍使用二维图像显示回转窑的表面温度, 这种热像图的直观性差, 立体感不强。针对上述问题, 提出了一种新方法, 对回转窑的表面温度场进行三维重建, 并以伪彩显示出回转窑整个表面的温度信息。实验表明, 生成的回转窑温度场的三维立体模型比传统热像图的效果更好, 更容易被工作人员辨识, 有利于工业生产。

**关键词:** 回转窑; 红外测温; 故障定位; 温度场; 三维重建

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.006

## Study of Reconstruction Algorithm of Infrared 3D Images Based on Rotary Kiln Surface Temperature Field

CHENG Ya-jun, TAN Wei

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

**Abstract:** Rotary kilns are the core equipment for clinker calcination in industrial production. To prevent the accidents caused by local high temperature, they need to be monitored in production in real time. In modern industries, the surface temperature of rotary kilns is usually monitored by infrared temperature measurement methods in real time. But in the process of monitoring, the faults should be located in real time. Traditional real-time rotary kiln monitoring methods generally use two-dimensional images to display the surface temperature of rotary kilns. The thermal images obtained by these methods are poor in intuition and stereoscopic sense. To solve the above problems, a new method which can reconstruct the surface temperature fields of a rotary kiln in three dimensions and display the temperature information on the whole surface of the rotary kiln in pseudo color is proposed. The experimental results show that the three-dimensional model of the temperature field of the rotary kiln generated is better than traditional thermal images and is easier to be identified by operators. This is beneficial to industrial production.

**收稿日期:** 2017-12-19

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61671094);重庆市科委项目(CSTC2015JCYJA40032)

**作者简介:** 程亚军(1990-),男,河南信阳人,硕士生,主要研究方向为红外图像处理和嵌入式软件开发。

E-mail: cyjenter@163.com

**Key words:** rotary kiln; infrared temperature measurement; fault location; temperature field; three-dimensional reconstruction

## 0 引言

在建材、冶金、化工和环保等行业中, 回转窑是生产工艺中物料煅烧环节中的大型核心设备<sup>[1-3]</sup>, 也是重要的能耗设备, 其运转情况直接决定着企业产品的质量、产量和生产成本, 如图 1 所示。回转窑筒体由钢板卷制而成; 内表面由耐火砖镶砌而成, 耐火砖主要用来保护窑筒体的钢板, 使其不受窑筒体内部 1500~1700 °C 高温气流烧蚀和物料磨损。窑筒体的表面温度与窑内状况密切相关。如果窑内温度过高, 会引起回转窑耐火材料脱落, 从而影响窑壁表层钢板的硬度, 情况严重时, 会导致窑筒体变形或发生红窑事故。反之, 如果窑内温度过低, 则会导致窑内物料煅烧质量不合格, 造成资源严重浪费和环境污染<sup>[4]</sup>。所以, 温度是回转窑生产过程中最重要的热工参数之一, 对其进行实时监测非常重要。

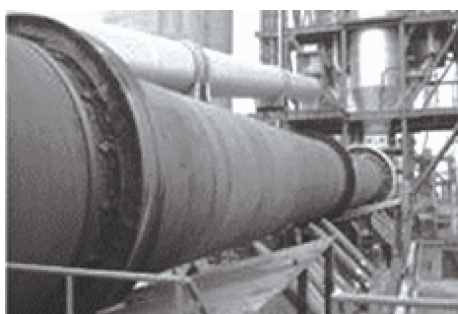


图 1 回转窑正常工作图

红外测温作为一种非接触式温度测量方法, 具有测量过程不干扰被测温场、测温范围宽、测温快速和操作方便等优点<sup>[5]</sup>, 已被广泛应用于回转窑温度的监测。实际生产中, 通过扫描仪获取回转窑的表面温度信息, 然后传输到计算机。计算机在处理这些信息时, 需用一种合适的显示方法让工作人员准确地得到回转窑的表面温度信息, 以进行温度点定位。国内的相关科研人员已经做了一些研究, 比如陈桂芳对回转窑筒体的表面三维热图像生成方法进

行了研究, 提出了一种立体模型, 利用温度和平面坐标生成三维信息<sup>[6]</sup>。高彦研究了窑筒体温度图像在线监测系统, 提出了二维热像图和三维热像图的显示方法<sup>[7]</sup>。刘强研究了水泥回转窑的状态监测系统, 提出了二维热像图、三维热像图和轴向热像图的显示方法<sup>[8]</sup>。这些显示方法都是基于二维图像的, 相对来说直观性不强, 在指导生产方面滞后。与二维平面相比, 三维空间能更直观、全面地反映更多信息, 且易被人们接受<sup>[9]</sup>。因此, 本文提出用一种三维重建法生成回转窑的三维模型, 显示回转窑的表面温度。

本文首先介绍回转窑的扫描测温原理, 然后介绍回转窑的三维重建原理, 主要包括三维立体坐标系的建立和三维立体坐标的确定, 最后通过软件仿真法对回转窑表面的温度场进行重建。实验结果显示, 重建后的三维立体模型有很好的显示效果, 与传统的三维热像图相比有更好的直观性, 在指导工作人员进行回转窑表面温度点定位方面具有重要作用和应用价值。

## 1 红外筒体扫描测温系统的测温原理

回转窑是一个大型的旋转筒体结构, 工业中使用扫描仪对回转窑表面进行水平扫描, 通过普朗克辐射定律可获取回转窑的表面温度信息。图 2 为本红外扫描系统测温系统的框架图, 该系统具有测温范围广、测温精度高的特点, 其测温范围为 100~500 °C, 在常温环境下测温精度为  $\pm 10$  °C。测温系统主要由三部分组成, 分别为扫描仪、传输设备和计算机监测软件。筒体扫描仪主要由三部分组成, 分别为扫描子系统、红外探测器和 DSP 核心处理电路, 其中探测器为光子型 HgCdTe 探测器, 响应波长范围为 3.5~4  $\mu\text{m}$ , 在探测范围内, 该探测器的灵敏度较高。回转窑作为辐射源, 向

四周辐射红外线。在扫描测温仪的测温视场内,各个方向的红外线经透红外的密封窗口进入到扫描仪内部,然后固定在同步扫描系统上的反射镜将红外线反射到探测器。同步扫描子系统主要由机械扫描装置和光学系统组成,而红外探测器是一种能够将红外辐射信号转换为电信号输出的器件。转换后的电信号经 DSP 核心处理电路处理后,通过网口经以太网传输给上位机软件。经计算机处理后,将整个窑筒体的表面温度以伪彩图显示出来。

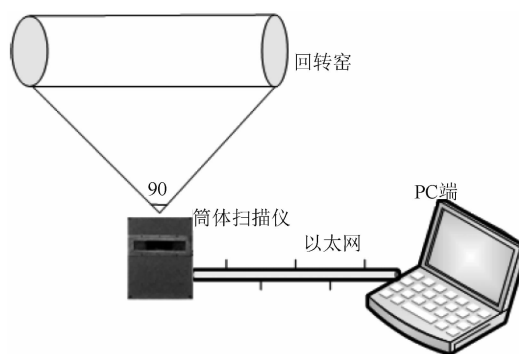


图 2 扫面测温系统的框架图

## 2 回转窑温度场三维坐标系的建立

扫描仪在安装时和回转窑轴线处于同一水平位置。在同步扫描子系统的作用下,按设定的扫描路线和扫描周期对回转窑表面进行同步转角扫描。扫描仪的扫描视场固定与回转窑的两端呈  $90^\circ$  夹角,扫描系统转动一圈后,得到一条温度线,同步扫描子系统使上位机软件刷新频率和回转窑的旋转速度保持一致;当回转窑旋转一圈时得到整个表面的温度信息。回转窑温度场三维立体模型的重建需要还原回转窑的外轮廓,并以伪彩的形式显示表面温度的具体信息。所以,在重建过程中需要确定回转窑的等效模型。

客观世界中的规则形体,无论是平面、长方体或者旋转体都有一个共同的特性,即几何对称性<sup>[10-11]</sup>。回转窑作为一个大型的旋转筒体结构,可等效为一个旋转的圆柱体。所以,根据几何对称性的特征,在对回转窑模型进行重建时,需要确定构成该旋转模型的旋转曲线

和对称轴。回转窑是一个大型的筒体结构,如图 3 所示,A、B 为筒体两底端的圆心,C、D 分别为筒体底端圆上的点,即 A、B、C、D 是回转窑上面的四个特征点。将 A、B、C、D 构成的矩形以中轴线 AB 为轴,按照如图 3 所示的方向旋转,可以生成旋转筒体。

根据回转窑旋转体的相关特征和扫描仪的扫描轨迹,决定以扫描系统的扫描起始点为坐标点,以窑筒体的中轴线所在的方向为 X 轴,以筒顶垂直于中轴线的两条直径所在的方向分别作为 Y 轴和 Z 轴,建立空间立体坐标系,如图 3 所示。

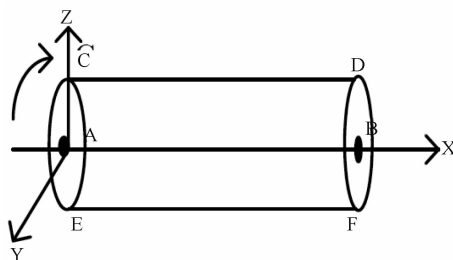


图 3 回转窑的立体模型结构

## 3 回转窑温度场模型的建立

图 4 为回转窑窑头的截面示意图。回转窑按照图 4 所示的方向旋转,扫描仪内部的机械扫描装置带动光学反光镜快速旋转一圈,在扫描仪的视场角范围内就能均匀采集到回转窑表面一条包络线的温度信息。由于回转窑自身旋转一周后,PC 端会收到窑的同步信号,扫描仪就可以进行回转窑的表面扫描。

扫描系统所扫描的温度线的数目和扫描系统的自身参数有关。当窑的转速一定并且扫描仪的视场和电机的步进角固定,回转窑旋转一圈时,扫描仪所扫描的温度线的数目一定。在本扫描系统中,电机转动一圈时会得到一条温度线;回转窑旋转一圈时,根据接收到的窑同步信号,计算出同步信号的个数,即回转窑在旋转一圈时所得到的扫描线条数,记为  $n$ 。回转窑转动的角度  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{2\pi}{n} = \frac{W}{R} \quad (1)$$

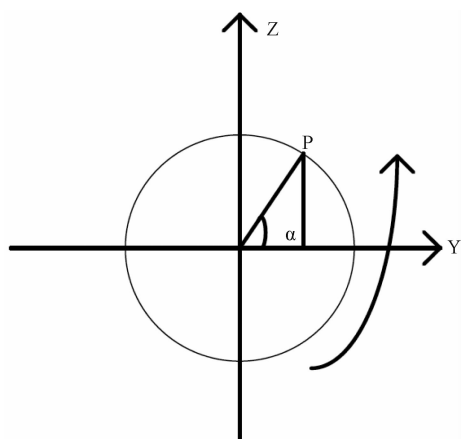


图 4 回转窑的截面示意图

所以, 由图 4 的数量关系可以得到:

$$z = R \sin(m\alpha) \quad (0 \leq m \leq n) \quad (2)$$

$$y = R \cos(m\alpha) \quad (0 \leq m \leq n) \quad (3)$$

沿径向可以得到坐标关系:

$$P(R \cos(m\alpha), R \sin(m\alpha)) \quad (0 \leq m \leq n) \quad (4)$$

图 5 为回转窑的横向坐标示意图。扫描仪的视场角为直角, 横向坐标即为沿回转窑轴向位置的坐标。在回转窑横向定位中, 等角度算法被广泛应用<sup>[7]</sup>。其原理是同步扫描中的电机驱动器驱动电机, 使电机旋转; 驱动器把同步扫描系统的脉冲信号转化为电机的角位移; 扫描系统每发送一个脉冲信号, 驱动器就使电机旋转相应的角度, 所以电机的转速与脉冲信号的频率成正比, 即在匀速状态下同步扫描系统旋转一圈时其脉冲数固定。本系统中, 驱动器转一圈发送 2800 个脉冲, 而扫描仪的视场角为  $90^\circ$ , 所以扫描回转窑表面每次可以得到 700 个点。在图 6 中,  $L$  为窑头到窑尾的长度,  $H$  为扫描头到窑的垂直长度,  $L_1$  为窑头到垂直点的长度,  $\chi$  为  $L_1$  所对应的角度,  $P_n$  为扫描温度线上的点,  $\alpha_i$  为扫描点所对应的角度。

由图 5 可得:

$$H^2 = L_1 \times (L - L_1) \quad (5)$$

式中,  $H$  和  $L$  的大小已知, 所以可得到  $L_1$  的大小为

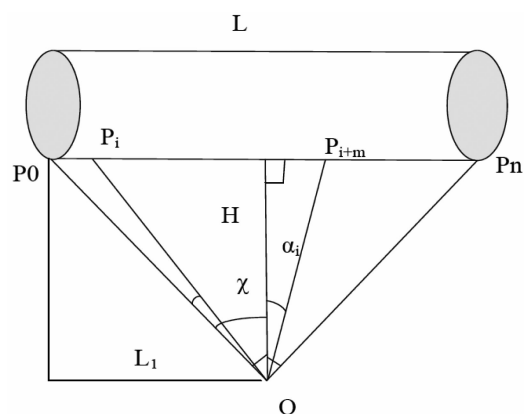


图 5 回转窑的横向坐标示意图

$$L_1 = \frac{L - \sqrt{L^2 - 4H^2}}{2} \quad (L^2 \geq 4H^2) \quad (6)$$

所以, 由图 5 中的几何关系和三角函数关系式, 可以得到扫描点到窑头的长度为

$$\begin{cases} \Delta P_i = L_1 - H \tan(\chi - \alpha_i) & (0 \leq \alpha_i \leq \chi) \\ \Delta P_i = L_1 - H \tan(\alpha_i) & (\chi \leq \alpha_i \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\chi = \arctan \frac{L_1}{H}$ , 式(7)即为回转窑的横向坐标关系。

所以由式(7)和式(4)可以得到回转窑立体模型中各点的坐标关系。当扫描点位于  $H$  点左边时, 有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - H \tan(\chi - \alpha_i) \\ R \cos(m\alpha) \\ R \sin(m\alpha) \end{bmatrix} \quad (8)$$

当扫描点位于  $H$  点右边时, 有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - H \tan(\alpha_i) \\ R \cos(m\alpha) \\ R \sin(m\alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### 4 实验测试

本实验是基于 OpenGL+QT 平台开发的。根据本文提出的温度场重建方法, 生成回转窑温度场的立体模型。本文所采用数据为某水泥有限公司的实际生产数据, 回转窑的长度为 60 m。图 6 为回转窑温度场的三维立体模型, 曲线图为当前扫描行的温度。在伪彩图中将温度映射成不同颜色, 其中高温对应暖色, 低温



对应冷色。由曲线图可知, 高温位置 15 m 和 20 m 位置处和三维立体图中的轴向位置基本一致, 图 6 中面向观察者的浅色区域为高温位置, 低温位置即图中冷色区域, 和轴向图保持一致。图 7 为传统的三维热像图。通过对比可知, 经过本方法实现的三维立体伪彩图具有更好的直观性, 能够指导工作人员进行回转窑维护, 可应用于实际生产。

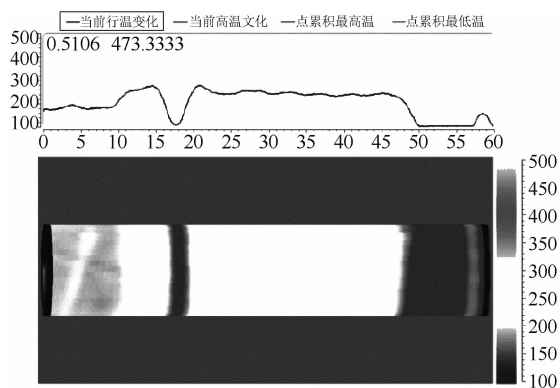


图 6 回转窑温度场的三维立体模型

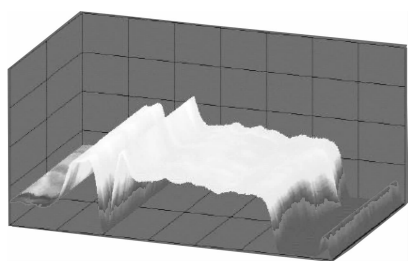


图 7 回转窑的三维热像图

## 5 结论

回转窑是工业生产中的重要生产设备, 在生产过程中通过回转窑表面温度间接判断了回转窑内部的燃烧状况。本文提出的三维重建技术很好地代替了传统的三维热像图, 工作人员可以直观地得到温度信息, 从而预测窑内燃烧的状况, 判断是否需要停窑进行检修。生产过程中, 主要通过表面温度以及人工经验判断窑皮的厚薄变化。本文提出的三维重建方法只显示了回转窑表面的温度情况, 并没有反映出窑

皮的厚度信息。而判断窑皮的厚度是工作人员的最终目的, 本方法并没有达到这一目标。后期的研究工作将通过回转窑中的热工关系得到表面温度和窑皮厚度的关系, 然后经三维重建技术得到窑皮厚度, 直接指导生产。

## 参考文献

- [1] Piton M, Huchet F, Corre O L, et al. A Coupled Thermal-granular Model in Flights Rotary Kiln: Industrial Validation and Process Design [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **75**: 1011–1021.
- [2] Kim S H, Nyande B W, Kim H S, et al. Numerical Analysis of Thermal Decomposition for RDX, TNT, and Composition B [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **308**: 91–104.
- [3] 徐琪, 危琦. 浅谈回转窑筒体测温的红外扫描监测系统 [J]. *有色冶金设计与研究*, 2008, **29** (5): 22–24.
- [4] 杜晓克, 王少林, 陈佩茹. 模糊模式识别应用于回转窑内衬故障检测 [J]. *微计算机信息*, 2009, **25**(10): 286–288.
- [5] 李军, 刘梅冬, 曾亦可, 等. 非接触式红外测温的研究 [J]. *压电与声光*, 2001, **23**(3): 202–205.
- [6] 陈桂芳, 申娇. 回转窑筒体表面三维热图像生成方法研究 [J]. *红外*, 2015, **36**(7): 16–20.
- [7] 高彦. 窑筒体温度图像在线监测系统的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [8] 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.
- [9] 王萌. 红外图像的三维重建理论及算法研究 [D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [10] 钱苏斌. 基于二维灰度图像的规则形体三维重建 [J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2012, **31**(3): 243–246.
- [11] 郑顺义, 徐刚, 张祖勋, 等. 旋转体三维重建方法研究 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, **31**(12): 1047–1050.