

# 基于图像拼接的空冷凝汽器散热面温度场测量

陈路路 李小路\* 贺涛 徐立军

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 空冷凝汽器散热面温度场测量是研究空冷凝汽器换热机理和传热特性的基础。提出一种基于图像拼接的空冷凝汽器散热面温度场测量方法。利用四台红外热像仪对散热面纵向进行拍摄,通过移动清洗支架对其横向进行拍摄,得到 124 幅具有重叠区域的红外子图像。对子图像进行几何畸变校正,并消除辐照度不均衡影响。以基管中心为特征,利用灰度投影的相位相关算法进行图像配准,获得散热面的完整配准图像,最大配准误差为 1 pixel。基于拼缝处有限行或列的灰度均值对已配准图像进行平滑处理,获得的连续温度场图像的最大空间分辨率较单幅图像提高了 4 倍,每个像素对应的散热面尺寸为 12 mm,测温精度达到  $\pm 0.4$  °C,可为优化空冷机组运行提供准确全面的空冷凝汽器温度分布信息。

**关键词** 测量;空冷凝汽器温度场;图像拼接;灰度投影;几何畸变校正

**中图分类号** TN216; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1112003

## Image-Matching-Based Temperature Field Measurement of Heat Dispersing Surface of Air-Cooled Condenser

Chen Lulu Li Xiaolu He Tao Xu Lijun

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education,

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Measurement of the temperature field of heat dispersing surface of air-cooled condenser (ACC) is the basis of researching its heat transfer mechanism and characteristics. An image-matching-based temperature field measuring method is presented. Four infrared thermal imagers are used to photograph the longitudinal range, while the horizontal range is photographed by moving cleaning stand. 124 infrared images with overlay area are photographed. Geometric distortion correction is applied to the infrared images, and irradiance imbalance is removed. Characterized by centers of base tubes, the phase correlation algorithm based on gray projection is used for registration. Entire registered image is obtained with registration error less than 1 pixel. Then, based on the average grayscale of limited numbers of rows or columns in joint seams, the registered image is smoothed. Continuous temperature field image of the overall heat dispersing surface can finally be obtained with the maximum spatial resolution four times higher than that of a single image. Each pixel represents 12 mm on the surface, and a temperature measurement accuracy of  $\pm 0.4$  °C is achieved. Comprehensive and accurate temperature distribution information of ACC can be provided by this method for the operation optimization of air-cooling units.

**Key words** measurement; temperature field of air-cooled condenser; image matching; gray projection; geometric distortion correction

**OCIS codes** 120.6650; 120.6780; 040.3060; 110.6820; 100.2000

## 1 引 言

空冷技术能够缓解我国富煤地区水资源短缺的矛盾。空冷系统中的蒸汽分配管与其周围散热翅片

的上表面构成了空冷凝汽器(ACC)的散热面。根据空冷凝汽器散热面的温度场可以研究空冷凝汽器散热面的传热机理、换热特性,对空冷机组的配置和

收稿日期: 2013-04-27; 收到修改稿日期: 2013-06-06

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAA16B01)

作者简介: 陈路路(1990—),女,硕士研究生,主要从事图像处理和测量方面的研究。E-mail: lulu\_beijing@126.com

导师简介: 徐立军(1968—),男,博士,教授,主要从事过程监测与成像方面的研究。E-mail: lijunxu@buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xiaoluli@buaa.edu.cn

运行优化具有指导意义。

目前,常用的空冷凝汽器散热面温度场测量方法有数值模拟<sup>[1-3]</sup>和红外成像测温<sup>[4-7]</sup>两种。关于第一种方法,已有很多学者进行了相关研究,但由于完整的空冷凝汽器散热面大至几百平方米,计算区域较大,难以获得空冷凝汽器散热面温度场的局部特征,并且由于空冷凝汽器的温度分布十分复杂,仅仅通过数值模拟无法对其进行全面的描述。最近几年,红外成像技术<sup>[4-7]</sup>的发展及其在电厂的推广应用为解决上述问题提供了新的思路。红外成像测温属于非接触式测温范畴,具有灵敏度高<sup>[4]</sup>、反应快等优点,并且可以实时获取物体表面的二维温度分布。Bougeard<sup>[5]</sup>采用红外成像技术测量了扁平基管的表面温度,论述了红外成像技术对于温度场测量的关键作用。Bougriou等<sup>[6]</sup>采用红外成像技术测得了翅片管束中圆形基管的温度分布,与常规的数值模拟方法相比,红外成像测温方法能够获得更丰富的温度场细节和更高的测温精度。Ge等<sup>[7]</sup>将红外成像测温方法应用于测量空冷凝汽器散热面的温度分布,测温精度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该方法使用单幅红外图像覆盖整个空冷凝汽器散热面,简单、快速,但由于测温距离较大,从获取的温度场图像中难以分辨出基管和翅片,细节信息较少。为了改善上述技术问题,本文将图像拼接技术与红外成像测温技术相结合<sup>[8]</sup>,提出一种基于图像拼接的空冷凝汽器散热面温度场测量方法。实验获取的温度场图像的空间分辨率更高,测温精度更高,细节信息更为丰富,能够更全面、清晰、准确地描述空冷凝汽器散热面的温度分布。

## 2 实验方法

基于图像拼接的空冷凝汽器散热面温度场测量

方法,首先利用4台红外热像仪对散热面纵向进行拍摄,通过移动清洗支架对其横向进行拍摄,得到多幅具有重叠区域的红外子图像;其次,对获取的红外子图像进行预处理,消除图像的几何畸变和辐照度不均影响;然后,以基管中心为特征,利用灰度投影的相位相关算法对预处理的红外子图像进行配准;最后,基于拼接处有限行或列的灰度均值对已配准的整幅图像进行平滑处理,获得完整的散热面温度图像。

### 2.1 系统构成

空冷凝汽器散热面的大小为 $10\text{ m}\times 100\text{ m}$ ,水平倾斜角度为 $60^{\circ}$ 。红外热像仪的视场角为 $21^{\circ}\times 16^{\circ}$ 。如果使用一台红外热像仪覆盖完整的空冷凝汽器散热面纵向,测温距离至少应为 $35.6\text{ m}$ ,而根据现场实验条件无法将红外热像仪安装于 $35.6\text{ m}$ 远的垂直距离处。如果利用空冷机组的清洗支架,通过计算得知,当把红外热像仪安装于被测散热面对应的清洗装置上时,至少需要13台红外热像仪才可以覆盖整个散热面纵向;当把红外热像仪安装于被测散热面相对一侧的清洗支架上时,只需要4台红外热像仪纵向排列就可以覆盖整个散热面纵向。综合考虑实验现场环境和工程代价,采用4台红外热像仪纵向排列安装于被测散热面相对一侧的清洗支架上,然后通过移动清洗支架多次拍摄实现对整个散热面的覆盖。由于测温距离越大,红外热像仪的视场范围越大,现场布置4台红外热像仪时应尽量将其安装于清洗支架顶端,并依次调整4台红外热像仪的倾斜角度实现对整个散热面纵向范围的覆盖,保证相邻两台红外热像仪的视场之间有重叠,如图1所示。红外图像拍摄过程如图2所示。通过快速移动清洗支架 $n$ 次实现对整个散热面的拍摄,其中, $\text{Ch}(i,j)$ 表示第 $i$ 台红外热像仪进行第 $j$ 次拍摄时的视场。

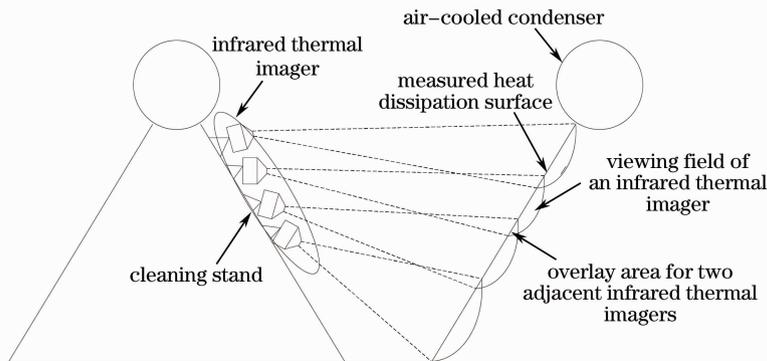


图1 四通道红外成像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the infrared imaging system using four infrared thermal imagers

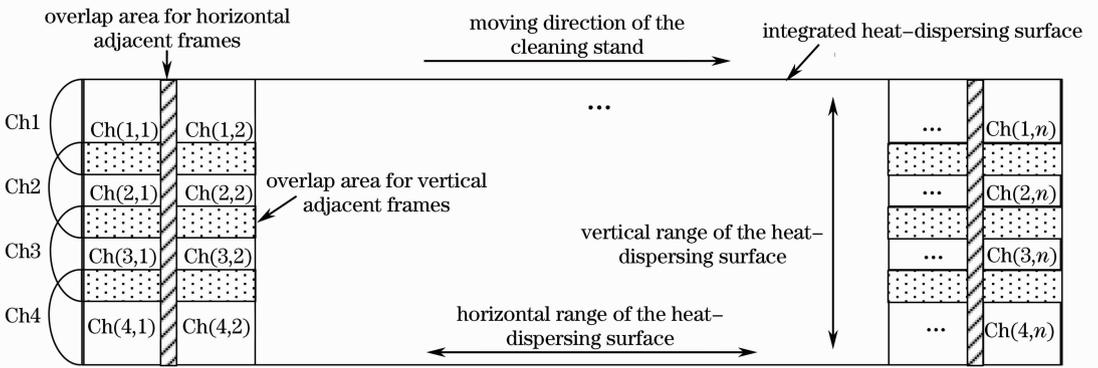


图 2 四台红外热像仪拍摄过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the photographing process using four infrared thermal imagers

红外热像仪通过以太网与交换机进行通信, 交换机以无线方式即时把红外图像传送给计算机; 计算机接收、显示红外图像, 并对红外热像仪进行控制。其中, 在拍摄之前, 通过在散热面上安装热电阻标定红外热像仪的发射率<sup>[9]</sup>。

## 2.2 温度场测量方法实现

### 2.2.1 红外图像预处理

由于四台红外热像仪有不同程度的倾斜, 红外热像仪的光轴和空冷凝汽器散热面不再垂直, 导致获取的红外子图像产生几何畸变。由于红外子图像纹理简单, 仅含有一定数量的竖线(基管)和横线(基管固定杆), 并且难以求得畸变图像中像素点的世界坐标, 因此, 选择基于消隐点的控制点变换算法<sup>[10]</sup>消除红外子图像的畸变。由于一组平行线交于同一个消隐点, 首先, 利用图像中相互平行的竖线或横线求得消隐点坐标; 然后通过校正后图像中的矩形和畸变图像中对应的四边形构造控制点对, 并根据消隐点坐标求得控制点对的空间变换关系; 最后基于三次灰度级插值算法产生一个能够保持图像灰度级连续性和连通性的光滑映射<sup>[11]</sup>。

此外, 由于同一时刻四台红外热像仪焦平面上获取的辐照度存在差异, 使得获取的纵向四幅图像之间存在灰度差异。通过在相邻两台红外热像仪的视场重叠区域内设置特征点, 根据特征点的灰度比值对相邻两幅已消除几何畸变的红外子图像间的灰度差异进行均衡<sup>[12]</sup>, 均衡后的图像再用于进一步处理。

### 2.2.2 基于灰度投影相位相关的图像配准

红外图像预处理使得校正图像中的竖线保持竖直、横线保持水平。通过图像的行灰度投影和列灰度投影<sup>[13-14]</sup>完全可以表征图像中的纹理特征。通过对预处理后红外图像的列灰度投影进行相位相关

运算<sup>[15-16]</sup>, 可以求得相邻两幅图像间的横向粗略偏移量; 对预处理后红外图像的行灰度投影进行相位相关运算, 可以求得图像间的纵向粗略偏移量。

根据上述步骤求取的相邻两幅图像间的粗略偏移量, 可以确定图像间的大致重叠区域。通过对大致重叠区域内的基管中心进行对齐, 可以确定两幅图像间的精确偏移量。其中, 在进行基管对齐之前, 首先通过灰度投影分别检测出两幅图像大致重叠区域中的基管中心; 再依据两个先验知识[1)基管中心处的灰度投影为极小值; 2)相邻基管间的间距为固定值]滤除干扰极值点; 最后, 根据灰度投影曲线中剩余的极小值位置和分布确定两幅图像间的精确偏移量。

### 2.2.3 图像融合

图像融合是一个灰度重投影的过程, 要求同时兼顾拼接图像效果和消除拼接图像间灰度突变两个方面<sup>[17]</sup>。对于横向相邻两幅图像的融合, 以拼缝左侧图像  $f_L(x, y)$  为参考图像, 首先计算  $f_L(x, y)$  中靠近拼缝处  $N$  列的平均灰度值(记为  $g_L$ ) 与拼缝右侧图像  $f_R(x, y)$  中靠近拼缝  $N$  列的平均灰度值(记为  $g_R$ ), 并计算两者的差值  $\Delta g_H$ :

$$\Delta g_H = g_R - g_L. \quad (1)$$

设拼缝右侧图像  $f_R(x, y)$  的宽度为  $W_R$ , 则拼缝融合的表达方式为

$$g_{pc} = -\frac{\Delta g_H}{W_R} \times x + \Delta g_H + g_{oc}, \quad (2)$$

式中  $x$  为待处理列与拼缝之间的距离,  $g_{oc}$  为待处理列的原始灰度值,  $g_{pc}$  为对待处理列融合处理后的灰度值。对于纵向相邻两幅图像的融合, 计算的是拼缝上侧图像  $f_U(x, y)$  中靠近拼缝处  $N$  行的平均灰度值(记为  $g_U$ ) 和拼缝下侧图像  $f_D(x, y)$  中靠近拼缝  $N$  行的平均灰度值(记为  $g_D$ ), 记  $g_U$  和  $g_D$  的差值为  $\Delta g_V$ , 拼缝下侧图像的宽度为  $W_D$ , 拼缝融合的表达

式为

$$g_{pr} = -\frac{\Delta g_v}{W_D} \times y + \Delta g_v + g_{or}, \quad (3)$$

式中  $y$  为待处理行与拼缝之间的距离,  $g_{or}$  为待处理行的原始灰度值,  $g_{pr}$  为对待处理行进行融合处理后的灰度值。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验结果

本次实验一共拍摄 124 幅红外子图像(每个通道有 31 幅), 拍摄时间从 2012 年 2 月 28 日 10:43 至 11:16。对于所有的红外子图像, 采用的拼接方案为:

1) 采用 2.2.1 节所述方法, 对所有的红外子图像进行预处理, 记四个通道预处理后的红外子图像分别为通道一图像、通道二图像、通道三图像和通道

四图像。

2) 采用 2.2.2 节所述方法, 求取通道一图像间的横向精确偏移量以及通道一图像和通道二图像间的横向精确偏移量, 两者相减可以得到通道二图像间的横向精确偏移量。依此类推, 分别求得通道三图像间和通道四图像间的横向精确偏移量。基于求得的四个通道图像间的横向精确偏移量, 对红外子图像分别进行配准可以得到四幅单通道完整配准图。

3) 采用类似求解横向精确偏移量的方法求取四幅完整配准图之间的纵向精确偏移量, 获得空冷凝汽器散热面的完整配准图, 如图 3 所示。

4) 采用 2.2.3 节所述方法, 对完整配准图的拼缝进行平滑得到空冷凝汽器散热面的完整红外图像, 如图 4 所示。

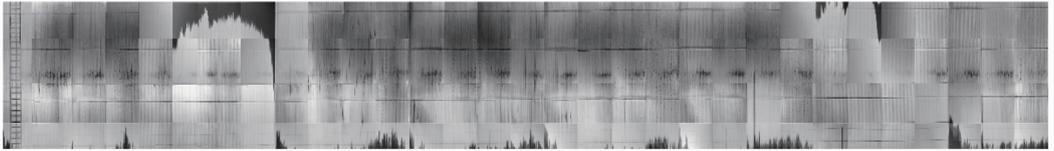


图 3 整个空冷凝汽器散热面的完整配准图像

Fig. 3 Integrated registered image of the overall heat-dispersing surface of ACC

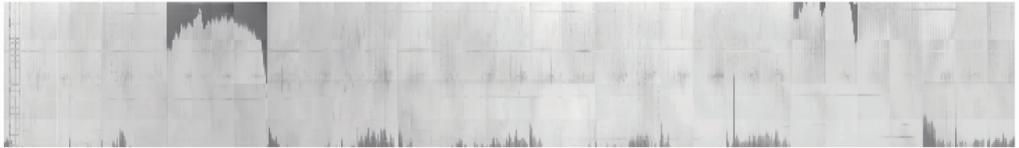


图 4 整个空冷凝汽器散热面的完整红外图像

Fig. 4 Integrated infrared image of the overall heat-dispersing surface of ACC

### 3.2 分析与讨论

#### 3.2.1 图像几何畸变校正结果分析

图像几何畸变校正结果如图 5 所示, 其中, 图 5(a) 为畸变图像, 图 5(b) 为畸变校正后的图像。通过检测几何畸变校正前后图像中的直线, 并进行统计得知, 校正后的竖线与  $y$  轴正向之间的夹角不超过  $0.1^\circ$ , 横线与  $x$  轴正向之间的夹角为  $0^\circ$ 。该基

于控制点变换的几何畸变校正方法能够高精度地消除红外子图像的几何畸变, 满足后续图像拼接的要求。

#### 3.2.2 图像配准结果分析

选择三、四通道的相邻两幅红外图像在拼缝处 81 列, 37 行的列灰度投影计算配准误差。图 6 为列灰度投影结果, 其中, 星号和圆圈标记点分别表示拼

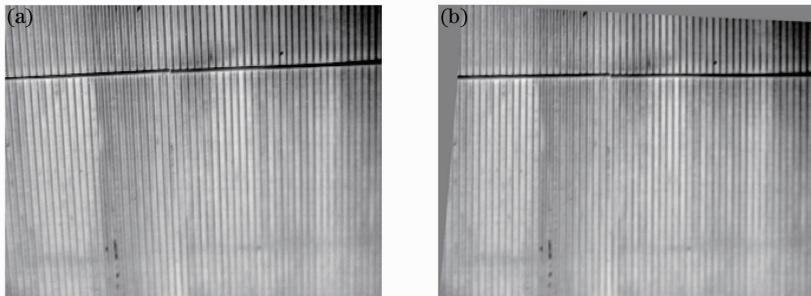


图 5 (a) 畸变图像; (b) 几何畸变校正后的图像

Fig. 5 (a) Distorted image; (b) corrected image

缝上侧图像和拼缝下侧图像中列灰度投影的极小值点(基管中心)。表 1 列出了图 6 中标记的基管中心在配准全景图中的位置及配准误差,从中可以看出,

最大配准误差为 1 pixel。可以得出:上述红外图像配准方法可以实现空冷凝汽器散热面红外子图像的高精度配准。

表 1 匹配基管在配准全景图中的位置及误差(单位: pixel)

Table 1 Positions and registration errors of the matching base tubes in entire registered image (unit: pixel)

Base tube number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Positions in upper image	1424	1430	1436	1441	1447	1453	1458	1464	1469	1475	1481	1487	1492	1498
Positions in lower side image	1424	1429	1435	1441	1447	1452	1458	1464	1469	1475	1481	1486	1492	1498
Registration error	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

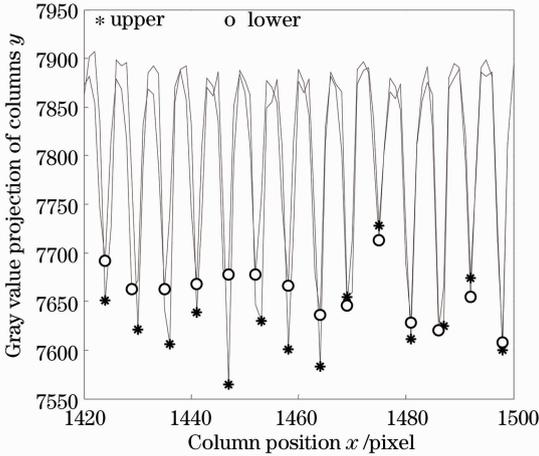


图 6 拼缝处上下相邻两幅红外图像的列灰度投影  
Fig. 6 Column projection of adjacent infrared images near the edge joint

### 3.2.3 温度场测量结果分析和讨论

对获取的 124 幅空冷凝汽器散热面红外子图像对应的温度矩阵进行拼接,如图 7 所示。其中,温度场图像的尺寸是 8369 pixel×805 pixel,左右相邻两幅图像间重叠宽度约为 51 pixel,上下相邻两幅图像间重叠高度约为 39 pixel,每个像素对应的散热面尺寸约为 12 mm,图像的纹理细节更为丰富。

图 7 右侧的颜色棒显示了温度和颜色之间的映射关系。可以得知,被测空冷凝汽器散热面的最高温度为 49.0 °C,最低温度为 21.4 °C,被测散热面的大部分区域温度集中在 40 °C 左右;所测空冷凝汽器散热面共包括 6 个顺流单元和 2 个逆流单元(图 7 中矩形标出部分);另外,根据图 7 还可以获知空冷凝汽器散热面上任意点的温度及任意区域的温度分布,从而可以详细分析空冷凝汽器散热面的换热机理、传热特性,对空冷机组的配置和运行优化具有指导意义。

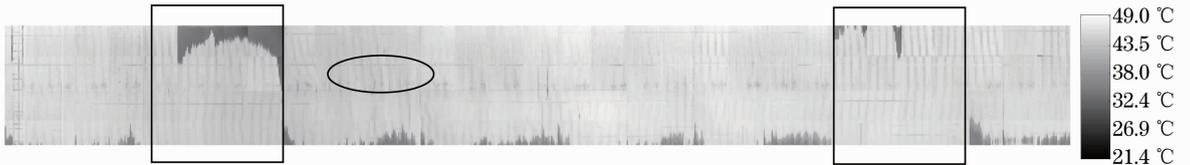


图 7 整个空冷凝汽器散热面温度场的灰度图像

Fig. 7 Gray image of the temperature field of entire heat-dispersing surface of ACC

在本实验过程中,空冷凝汽器散热面的温度场不断变化,致使相邻两幅红外图像之间存在灰度差异,另外,透过空冷凝汽器 U 型翅片管束的光线垂直进入红外热像仪的光平面使得温度场图像中存在“毛刺”(如图 7 中椭圆圈出部分)。因此,如何更精确地调节和控制红外热像仪的倾斜角度、对焦状况和拍摄距离等,还有待于更进一步研究。

得的空冷凝汽器散热面连续温度场图像的最大空间分辨率较单幅红外图像提高了 4 倍,其中,每个像素对应的散热面尺寸为 12 mm,其纹理细节更为丰富,并且测温精度达到±0.4 °C。该方法能够更全面、清晰、准确地描述空冷凝汽器散热面的温度分布。基于此,可以进一步研究环境温度、翅片管束表面的污垢程度以及自然风对空冷发电机组的影响,对空冷机组的配置和运行优化具有指导意义。

## 4 结 论

提出了一种基于图像拼接技术的空冷凝汽器散热面温度场测量方法。实验结果表明,本文方法获

### 参 考 文 献

1 Zhou Wenping, Tang Shengli. Coupled flow-field calculation of a direct air-cooled condenser's component unit [J]. J Power

- Engineering, 2007, 27(5): 766–770.
- 周文平, 唐胜利. 空冷凝汽器单元流场的耦合计算[J]. 动力工程, 2007, 27(5): 766–770.
- 2 Yang Lijun, Zhou Jian, Du Xiaoze, *et al.*. Numerical analysis of flow and heat transfer outside the flat wave-finned tube [J]. J Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 122–124.  
杨立军, 周 健, 杜小泽, 等. 扁平管外蛇形翅片空间的流动换热性能数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 122–124.
- 3 Zhu Song, Li Jingsha, Yang Lala, *et al.*. Flow and heat transfer characteristics of finned heat flow and heat transfer characteristics of finned radiator in direct air-cooled condenser [J]. Electric Power Construction, 2011, 32(7): 63–67.  
朱 嵩, 李敬莎, 杨腊腊, 等. 直接空冷凝汽器翅片散热器流动传热特性[J]. 电力建设, 2011, 32(7): 63–67.
- 4 Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie, *et al.*. Analysis of optical readout sensitivity for uncooled infrared imaging based on optical readout [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0204002.  
程 腾, 张青川, 高 杰, 等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0204002.
- 5 D Bougeard. Infrared thermography investigation of local heat transfer in a plate fin and two-tube rows assembly [J]. International J Heat and Fluid Flow, 2007, 28(5): 988–1002.
- 6 C Bougriou, R Bessah, R Le Gall, *et al.*. Measurement of the temperature distribution on a circular plane fin by infrared thermography technique [J]. Appl Thermal Eng, 2004, 24(5–6): 813–825.
- 7 Ge Zhihua, Du Xiaoze, Yang Lijun, *et al.*. Performance monitoring of direct air-cooled power generating unit with infrared thermography [J]. Appl Thermal Eng, 2011, 31(4): 418–424.
- 8 Gao Meijing, Gu Haihua, Guan Congrong, *et al.*. Adaptive position calibration for thermal microscopic imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0111002.  
高美静, 顾海华, 关丛荣, 等. 显微热成像系统自适应位置标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0111002.
- 9 Yang Junwei, Hu Zhongxiang, Shi Xiaojun, *et al.*. Error analysis of on-line temperature-field measurement by infrared CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1281–1284.  
杨军伟, 胡仲翔, 时小军, 等. 红外 CCD 在线温度场测量误差分析[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1281–1284.
- 10 Richard I Hartley. Theory and practice of projective rectification [J]. International J Computer Vision, 1999, 35(2): 115–127.
- 11 Yang Xiaogang, Miao Dong, Fu Guangyuan, *et al.*. Auto-decision method for control point of image geometric rectification [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 194–198.  
杨小冈, 缪 栋, 付光远, 等. 图像几何校正控制点的自动确定方法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 194–198.
- 12 Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong, *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0611005.  
洪闻青, 杨南生, 王晓东, 等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0611005.
- 13 Sheng Yehua, Zhang Ka, Ye Chun, *et al.*. Stereo image matching for digital close-range photogrammetry based on gray-scale projection [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1623–1628.  
盛业华, 张 卡, 叶 春, 等. 基于灰度投影的数字近景摄影立体影像匹配[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1623–1628.
- 14 Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Du Dong, *et al.*. Gray projecting integral method for line detection [J]. J Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(11): 1446–1449.  
张文增, 陈 强, 都 东, 等. 直线检测的灰度投影积分方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(11): 1446–1449.
- 15 Li Zhongxin, Zhang Dengfeng, Mao Yaobin, *et al.*. Cylindrical panoramic image mosaicing based on phase correlation method [J]. J Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002, 26(S): 43–46.  
李忠新, 张登峰, 茅耀斌, 等. 基于相位相关法的柱面全景图拼接技术[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2002, 26(S): 43–46.
- 16 B Srinivasa Reddy, B N Chatterji. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Trans Image Processing, 1996, 5(8): 1266–1271.
- 17 Feng Yuping, Dai Ming, Sun Liyue, *et al.*. Optimized design of automatic image mosaic [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 470–476.  
冯宇平, 戴 明, 孙立悦, 等. 图像自动拼接融合的优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 470–476.

栏目编辑: 何卓铭