

## 日光温室热工缺陷面积热红外图像测量方法

曹晏飞<sup>1</sup>, 鲍恩财<sup>1</sup>, 邹志荣<sup>1\*</sup>, 何斌<sup>2</sup>, 徐文俊<sup>3</sup>, 安康平<sup>1</sup>, 王建雄<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 3. 天龙集团公司内蒙古北隆生态农业科技有限公司, 包头 014010)

**摘 要:** 隔热层和气密性缺陷是日光温室保温蓄热性能差的重要因素, 为了快速检测日光温室热工缺陷区域及测量该区域的面积, 该文借助热红外成像仪和 LabVIEW 软件平台, 构建了基于热红外图像日光温室热工缺陷区域面积测量方法。以陕西杨凌西北农林科技大学园艺场日光温室北墙风口为测试对象, 通过现场实测数据与理论计算结果进行比较分析。首先, 利用热红外成像仪实时检测出日光温室北墙通风口表面与墙体内部存在的明显温度差异, 其最大温差高达 8.4℃。基于温度差异, 能快速找出温室内围护结构不同位置所存在的明显散热区域。然后通过直方图法、均方根法和人工提取法分别计算了散热区域面积, 其中直方图面积测量方法具有较好的效果, 平均相对误差为 5.4%; 人工提取法次之, 平均相对误差为 6.0%, 均方根法最大, 平均相对误差为 11.8%。研究结果表明, 基于热红外图像的直方图面积测量方法能快速检测出热工缺陷区域的面积, 为进一步自动定量分析整个日光温室热工缺陷区域的面积及散热量提供了理论方法, 在温室围护结构热工损耗计算方面具有较大应用潜力, 可为农民和企业提出日光温室优化改造建议。

**关键词:** 热力学; 缺陷; 图像采集; 热红外图像; 日光温室; 面积测量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.027

中图分类号: S127; S625.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-24-0206-06

曹晏飞, 鲍恩财, 邹志荣, 何斌, 徐文俊, 安康平, 王建雄. 日光温室热工缺陷面积热红外图像测量方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 206—211. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.027 <http://www.tcsae.org>

Cao Yanfei, Bao Encai, Zou Zhirong, He Bin, Xu Wenjun, An Kangping, Wang Jianxiong. Method for measuring thermodynamic disfigurement area in Chinese solar greenhouse by utilizing thermal infrared image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 206—211. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.027 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

日光温室作为具有中国特色的园艺设施, 由于其具有连栋温室所无法比拟的良好性价比, 和塑料大棚无法比拟的低成本越冬生产性能, 近年来在中国北方地区得到了大面积的推广<sup>[1-2]</sup>。研究人员针对不同类型日光温室的保温蓄热性能也开展了大量的研究工作<sup>[3-12]</sup>, 最低保证温度<sup>[13]</sup>、热环境传热数学模型<sup>[14-15]</sup>、热阻、传热系数、热惰性指标等材料热工参数<sup>[16]</sup>均被用于日光温室结构保温和隔热设计。日光温室的隔热层和气密性缺陷是造成温室保温性能不稳定的重要影响因素<sup>[3]</sup>, 因此, 需要找出合适的方法与设备来诊断出温室的问题所在。利用温湿度环境传感器监测温室内的热环境, 仍然是目前用来评价温室保温蓄热性能优劣程度的常规方法, 不过该测试方法仅采用一个测试点或多个测试点的温湿度来代表

整个面或体的温湿度, 且测试点的温湿度环境受温室建造、管理方式等影响较大, 难以准确地寻找出日光温室缺陷区域。

热红外成像技术能够把人眼在可见光范围内无法观察到的物体表面热分布可视化, 以灰度差或伪彩色形式表现物体各点的温度及温度差, 从而实现无损检测<sup>[17]</sup>。该技术在建筑<sup>[18]</sup>、电气<sup>[19]</sup>、医学<sup>[20]</sup>等领域得到了广泛的应用。近年来, 研究人员也开始将热红外成像技术应用于农业领域<sup>[21]</sup>, 如: 利用热红外成像技术检测作物是否受到外界胁迫<sup>[22]</sup>、果实识别<sup>[23]</sup>、植物是否感染病害<sup>[24-25]</sup>等。

日光温室密闭性较差, 从而引起温室表面温度不均匀分布, 其中日光温室内围护结构表面温度值低于某一阈值的点的集合统称为热工缺陷区域。为了寻找出日光温室的散热途径, 陈来生等利用热红外成像仪对日光温室进行了全面检测, 结果显示该方法具有较好的效果, 可直观判断出日光温室散热区域<sup>[26]</sup>。本文作者在此研究基础上, 提出一种基于热红外图像的日光温室热工缺陷区域面积测量方法, 从而为实现日光温室热工缺陷区域面积以及散热量的定量分析提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

试验于 2015 年 12 月在陕西杨凌西北农林科技大学北校区园艺场日光温室中进行, 温室长 52.0 m, 净跨度

收稿日期: 2016-06-26 修订日期: 2016-08-16

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016KTCL02-02); 博士科研启动基金 (2452015274)

作者简介: 曹晏飞, 男, 湖南娄底人, 讲师, 博士, 主要从事设施农业信息化及环境调控。杨凌 西北农林科技大学园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 712100。Email: bmxzbx@126.com

※通信作者: 邹志荣, 男, 陕西延安人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业研究。杨凌 西北农林科技大学园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 712100。Email: zouzhihong2005@163.com

8.0 m, 北墙高 2.2 m、厚 1.0 m, 外加 10 cm 厚聚苯板, 脊高 3.9 m, 墙体材料为黏土砖, 北墙设置 16 个通风洞口, 温室前屋面采用保温被覆盖。

试验选用的热红外成像仪为美国菲利尔 (FLIR) 公司的 E4, 波长范围: 7.5~13  $\mu\text{m}$ , 视场角/最小焦距: 45°×34°/0.5 m, 热灵敏度: 0.15  $^{\circ}\text{C}$ , 温度测量范围: -20~250  $^{\circ}\text{C}$ , 精度:  $\pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ , 分辨率: 320×240 像素。试验在晴天进行, 时间选在典型晴天 2015 年 12 月 15 日 15:30~16:30 (盖帘前, 平均空气温度为 19.2  $^{\circ}\text{C}$ )。将热红外成像仪固定安装在三脚架上, 垂直于北墙正前方, 距北墙位置为 1.5 m, 设定辐射率为 0.95, 反射温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ , 测量前热像仪自动校准 3 遍。

## 1.2 基于热红外图像的面积计算方法

热红外成像仪是利用目标物体自身发射的热辐射成像, 即其可同时测量物体表面各点温度的高低, 并以图像形式直观显示出物体表面温度场。根据该特点, 热红外图像中的温度差可用来作为计算目标物体热工缺陷区域面积的基础, 具体检测流程如图 1 所示。

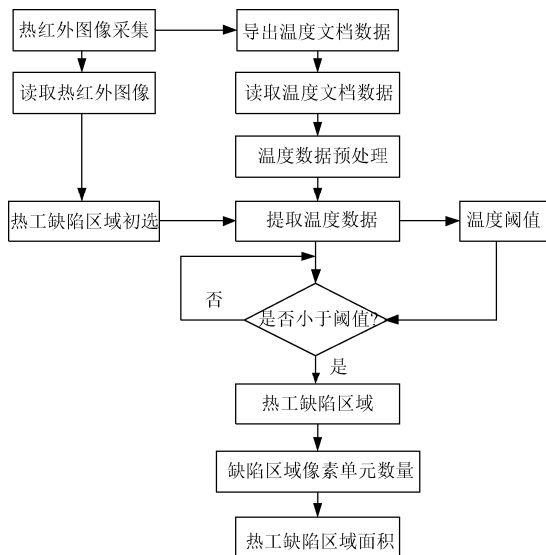


图 1 面积计算方法流程图

Fig.1 Flow chart of area calculation method

基于热红外图像的热工缺陷区域面积计算方法包括 3 个步骤: 1) 采用热像仪采集目标物体的热红外图像采集, 利用 FLIR Tools 软件提取出相应热红外图像的温度数据文档。2) 利用 LabVIEW13.0 软件读取热红外图像, 人工初步截取包含热工缺陷区域的热红外图像, 并导入相应的温度文档数据与温度阈值进行比较, 识别出热工缺陷区域。3) 统计热工缺陷区域像素单元的数量, 根据其在整个热红外图像中所占的比例, 计算出相应的热工缺陷区域面积。

### 1.2.1 阈值的选择

热红外成像仪判断围护结构热工缺陷的重要步骤是分析热红外图像上是否存在热工异常<sup>[27]</sup>, 其中选择适宜的温度阈值是检验该方法是否准确的关键。

#### 1) 直方图法

直方图是一种基于统计的特征描述子, 是计算机视

觉领域常用的图像特征之一<sup>[28]</sup>。在热红外图像中, 利用直方图统计温度分布, 指定温度区间宽度  $\Delta x$  在温度文档数据序列  $x_i$  中出现次数的频率计数。温度区间宽度  $\Delta x$  定义为:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{m} \quad (1)$$

式中  $x_{\max}$  为温度文档数据序列  $x_i$  的最大值,  $x_{\min}$  为温度文档数据序列  $x_i$  的最小值,  $m$  为区间数量, 设为 10。

温度区间的中心  $c_k$  定义为

$$c_k = x_{\min} + \frac{\Delta x}{2} + k\Delta x \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (2)$$

式中  $k$  表示温度区间的变量。

热红外图像的温度直方图  $h_k$  反映了图像温度区间分布, 其表达式为

$$h_k = \frac{n_k}{N} \times 100\% \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (3)$$

式中  $N$  为热红外图像的总像素数,  $n_k$  为每个温度区间的像素数量。

### 2) 均方根法

均方根法是指在面积计算过程中以温度数据序列  $x_i$  的均方根值  $\psi_x$  为基础, 温度阈值设置为  $(\psi_x + 1)^{\circ}\text{C}$ , 均方根值  $\psi_x$  定义为

$$\psi_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i|^2} \quad (4)$$

式中  $n$  为温度数据序列  $x_i$  的数量。

### 1.2.2 人工提取法

判断分析热红外图像中是否存在热工异常, 既可以通过温度阈值比较, 也可以通过人工肉眼模糊选择。在步骤②中, 当读取热红外图像之后, 首先通过肉眼判断出温度异常区域在热红外图像中的大体位置, 然后人工利用方框选择温度异常区域作为热工缺陷区域, 最后通过计算机直接统计计算方框区域的像素单元个数, 计算其在整个热红外图像中所占的比例以及面积。

## 1.3 热像仪视野区域面积计算

如图 2 所示, 根据热像仪与被测物体之间的距离, 热像仪的水平和垂直视场角, 计算出热像仪视野区域的面积。

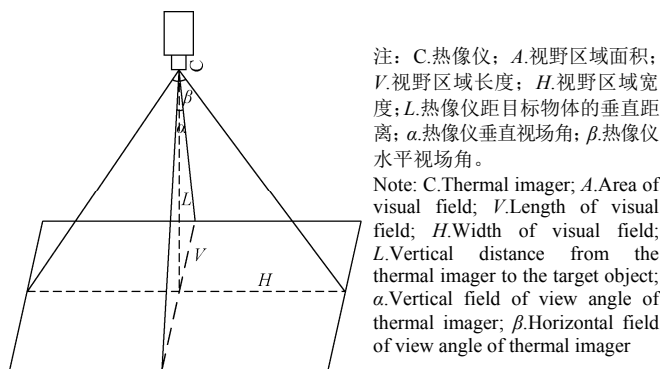


图 2 热像仪视野区域面积计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of area calculation of thermal imager visual field

$$A=4L^2\tan\frac{\alpha}{2}\tan\frac{\beta}{2}\tag{5}$$
$$V=2L\tan\frac{\alpha}{2}\tag{6}$$
$$H=2L\tan\frac{\beta}{2}\tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 日光温室热红外图像

日光温室后墙的可见光图像与热红外图像如图 3 所示。尽管对北墙通风口进行了封堵,但通风口的表面温度与内墙表面的温度仍然存在明显差异,最大温差可达到 8.4℃,显然根据热红外图像,人肉眼可见发现在可见光图像不能看到的温度差异,从而能够快速找出热工散热区域,有助于温室建造、管理质量检测。

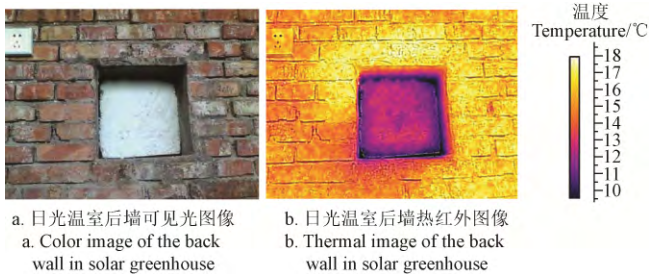


图 3 日光温室后墙可见光图像和热红外图像  
Fig.3 Digital color reflectance images and thermal images of back wall in solar greenhouse

2.2 日光温室通风口温度直方图分布

温度直方图是温度区间的函数,它表示热红外图像中不同温度区间的像素所占的比例,反映不同温度区间所占的面积。图 4 为人工初步截取日光温室后墙包含通风口的热红外图像,图 5 为该区域的温度区间分布直方图,横坐标表示 10 个不同温度区间的中心温度,变化范围从 7.7~19.5℃。纵坐标表示 10 个温度区间所占的比例。随着温度的升高,温度区间所占的比例开始呈现逐渐增加,又逐步减少,最后又增加的趋势。区间中心温度为 12.9℃的区间所占比例最大,说明通风口表面较大区域的温度在 12.9℃左右。中心温度为 16.9℃区间所占比例与中心温度为 18.2℃区间所占比例存在较大差距,说明通风口与墙体搭接处的温度在 16.9℃左右,可依据该特征设置温度阈值,统计小于该温度阈值的温度区间所占比例,并据此计算通风口面积。

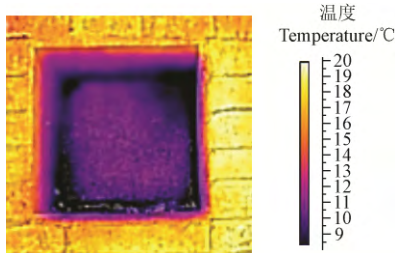


图 4 日光温室通风口热红外图像  
Fig.4 Thermal image of wind vent in solar greenhouse

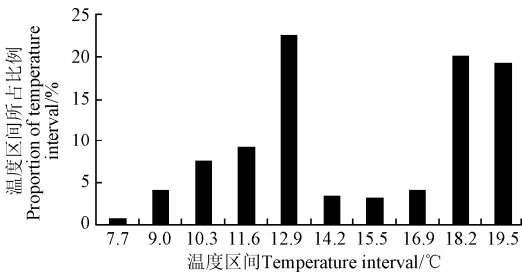


图 5 日光温室通风口温度区间分布直方图  
Fig.5 Temperature interval distribution histogram of wind vent in solar greenhouse

2.3 日光温室热工缺陷区域面积测量

热工缺陷区域为温室内表面温度过低点的集合,从 2.2 节的日光温室通风口热红外图像可知,日光温室后墙通风口温度明显低于墙体其他区域,即为热工缺陷区域。为了比较不同面积测试方法的准确性,从采集的图像中选择了 12 幅包含通风口的日光温室后墙热红外图像,同时在拍摄点处人工利用卷尺等接触式的测量工具,多次测量通风口的高度、宽度,取相应平均值计算实测面积,并以此作为真实值来比较日光温室热工区域面积不同测量方法的相对误差。为减少人为因素影响,不同面积测量方法均进行 3 次重复测量,选取 3 次测量的平均值作为测量结果。试验结果如表 1 所示,在 3 种面积测量方法中,直方图法的平均相对误差最小,为 5.4%,人工提取法次之,平均相对误差为 6.0%,均方根法最大,平均相对误差为 11.8%。

表 1 实测数据与理论计算结果的对比  
Table 1 Comparison of measured data and theoretical calculated results

编号 Number	实测法 Artificial measurement method	直方图法 Histogram method		均方根法 RSM method		人工提取法 Manual extraction method	
	面积 Area/mm <sup>2</sup>	面积 Area/ mm <sup>2</sup>	相对误差 Relative error/%	面积 Area/ mm <sup>2</sup>	相对误差 Relative error/%	面积 Area/ mm <sup>2</sup>	相对误差 Relative error/%
1	96 100	96 781	0.7	77 688	19.2	102 635	6.8
2	94 550	87 113	7.9	85 183	9.9	98 164	3.8
3	94 550	88 367	6.5	88 720	6.2	100 608	6.4
4	91 500	88 790	3.0	88 408	3.4	98 594	7.8
5	97 030	85 636	11.7	88 146	9.2	99 737	2.8
6	96 410	87 298	9.5	93 652	2.9	100 588	4.3
7	96 410	92 226	4.3	108 310	12.3	87 994	8.7
8	96 100	96 500	0.4	102 498	6.7	89 898	6.5
9	96 100	86 030	10.5	86 697	9.8	94 558	1.6
10	93 635	92 099	1.6	87 607	6.4	93 786	0.2
11	93 328	93 472	0.2	69 820	25.2	86 074	7.8
12	95 790	87 462	8.7	66 692	30.4	81 266	15.2
平均值 Average value	95 120	90 148	5.4	86 952	11.8	94 492	6.0

均方根法受人工截取图中各个热工区域所占比例影响较大,当热工散热区域所占比例较大时,该方法较为准确,反之,则误差相对较大。人工提取法是根据人的肉眼标记出热工区域的边界区域,受边界区域的清晰度影响较大。

### 3 结 论

利用热红外成像仪实时检测出日光温室北墙通风口表面与墙体内表面存在的明显温度差异,其最大温差高达8.4℃。此方法能够快速找出温室围护结构不同位置所存在的明显散热区域。

基于散热区域热红外图像,利用直方图法、均方根法、人工提取法对散热区域面积进行理论计算,然后将理论结果与散热区域实测数据相比较,直方图法的平均相对误差最小,为5.4%。结果表明该方法具有较高的测量精度,可实现热工散热区域的自动测量,在温室围护结构热工参数测量方面具有较大的应用潜力。

下一步将基于此方法计算日光温室整体散热区域面积,并定量比较分析不同类型日光温室围护结构缺陷区域的相对面积,通过热工缺陷等级等参数来判断日光温室建造是否规范,管理方式是否合理,同时该方法在建筑等领域也具有广泛的实用性。

#### [参 考 文 献]

- [1] 徐凡,马承伟,曲梅,等.华北五省区日光温室微气候环境调查与评价[J].中国农业气象,2014,35(1):17—25.  
Xu Fan, Ma Chengwei, Qu Mei, et al. Investigation and assessment on microclimate environment of solar greenhouse in north China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(1): 17—25. (in Chinese with English abstract)
- [2] 魏晓明,周长吉,曹楠,等.中国日光温室结构及性能的演变[J].江苏农业学报,2012,28(4):855—860.  
Wei Xiaoming, Zhou Changji, Cao Nan, et al. Evolution of structure and performance of Chinese solar greenhouse[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28(4): 855—860. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孙周平,黄文永,李天来,等.彩钢板保温装配式节能日光温室的温光性能[J].农业工程学报,2013,29(19):159—167.  
Sun Zhouping, Huang Wenyong, Li Tianlai, et al. Light and temperature performance of energy-saving solar greenhouse assembled with color plate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 159—167. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邱仲华,宋明军,王吉庆,等.组装式太阳能双效温室应用效果试验[J].农业工程学报,2014,30(19):232—239.  
Qiu Zhonghua, Song Mingjun, Wang Jiqing, et al. Experiment effect of application to new assembly type solar double effect greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(19): 232—239. (in Chinese with English abstract)
- [5] 方慧,张义,杨其长,等.日光温室金属膜集放热装置增温效果的性能测试[J].农业工程学报,2015,31(15):177—182.  
Fang Hui, Zhang Yi, Yang Qichang, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release metal film in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 177—182. (in Chinese with English abstract)
- [6] 凌浩恕,陈超,陈紫光,等.日光温室带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系[J].农业机械学报,2015,46(3):336—343.  
Ling Haoshu, Chen Chao, Chen Ziguang, et al. Performance of phase change material wall vertical air channels integrating solar concentrators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 336—343. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵淑梅,马承伟,程杰宇,等.日光温室空气对流循环蓄热墙体的开发研究[J].农业工程技术:温室园艺,2015(12):40—43.
- [8] 张勇,邹志荣,李建明.倾转屋面日光温室的采光及蓄热性能试验[J].农业工程学报,2014,30(1):129—137.  
Zhang Yong, Zou Zhirong, Li Jianming. Performance experiment on lighting and thermal storage in tilting roof solar-greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 129—137. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张勇,高文波,邹志荣.日光温室主动蓄热后墙传热CFD模拟及性能试验[J].农业工程学报,2015,31(5):203—211.  
Zhang Yong, Gao Wenbo, Zou Zhirong. Performance experiment and CFD simulation of heat exchange in solar greenhouse with active thermal storage back-wall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 203—211. (in Chinese with English abstract)
- [10] 梁浩,方慧,杨其长,等.日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试[J].农业工程学报,2013,29(12):187—193.  
Liang Hao, Fang Hui, Yang Qichang, et al. Performance testing on warming effect of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 187—193. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李明,周长吉,魏晓明.日光温室墙体蓄热层厚度确定方法[J].农业工程学报,2015,31(2):177—183.  
Li Ming, Zhou Changji, Wei Xiaoming. Thickness determination of heat storage layer of wall in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 177—183. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘彦辰,邹志荣,胡晓辉,等.陕西关中地区不同跨度日光温室光温环境分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(2):108—116.

- Liu Yanchen, Zou Zhirong, Hu Xiaohui, et al. Analysis of light and temperature conditions of sunlight greenhouses with different span lengths in Central Shaanxi Plain[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(2): 108—116. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈青云. 日光温室的实践与理论[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 343—350.
- Chen Qingyun. Progress of practice and theory in sunlight greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 343—350. (in Chinese with English abstract)
- [14] Tong Guohong, Christopher David M, Li Tianlai, et al. Passive solar energy utilization: A review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(26): 540—548.
- [15] 马承伟, 卜云龙, 籍秀红, 等. 日光温室墙体夜间放热量计算与保温蓄热性评价方法的研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 411—415.
- Ma Chengwei, Bu Yunlong, Ji Xiuhong, et al. Method for calculation of heat release at night and evaluation for performance of heat preservation of wall in solar greenhouse[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 411—415. (in Chinese with English abstract)
- [16] 柳孝图. 建筑物理(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] 杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] 衡涛, 江俊佳. 红外热成像仪对围护结构缺陷温度场变化规律的研究与分析[J]. 建筑节能, 2015, 43(6): 110—114.
- Heng Tao, Jiang Junjia. Temperature field variation law on building envelope defect by infrared thermal imager[J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(6): 110—114. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吕俊, 王福田, 汤进, 等. 基于全景温度场的电力设备在线自动识别与诊断[J]. 计算机与现代化, 2015(8): 19—23.
- Lü Jun, Wang Futian, Tang Jin, et al. Online automatic recognition and diagnosis of electrical devices via thermal panorama[J]. Computer and Modernization, 2015(8): 19—23. (in Chinese with English abstract)
- [20] 戚沁园, 陈长青, 郭建茹, 等. 热红外技术在中医诊断中的应用[J]. 世界科学技术: 中医药现代化, 2011, 13(6): 1027—1031.
- Qi Qinyuan, Chen Zhangqing, Guo Jianru, et al. Application of thermal infrared technology in traditional Chinese medicine diagnosis[J]. World Science and Technology: Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 2011, 13(6): 1027—1031. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周建民, 周其显, 刘燕德. 红外热成像技术在农业生产中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 1—4.
- Zhou Jianmin, Zhou Qixian, Liu Yande. Application of infrared thermography techniques in agricultural production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李真, 史智兴, 王成, 等. 红外热成像技术在作物胁迫检测方面的应用[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 232—237.
- Zhen Li, Zhixing Shi, Cheng Wang, et al. The application progress of infrared thermography for crop stress detection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 232—237. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐惠荣, 应义斌. 红外热成像在树上柑桔识别中的应用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5): 353—356.
- Xu Huirong, Ying Yibin. application of infrared thermal imaging in identification of citrus on trees[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(5): 353—356. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐小龙, 蒋焕煜, 杭月兰. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 145—149.
- Xu Xiaolong, Jiang Huanyu, Hang Yuelan. Study on detection of tomato mosaic disease at early stage based on infrared thermal imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 145—149. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李小龙, 王库, 马占鸿, 等. 基于热红外成像技术的小麦病害早期检测[J]. 农业工程学报, 2014(18): 183—189.
- Li Xiaolong, Wang Ku, Ma Zhanhong, et al. Early detection of wheat disease based on thermal infrared imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 183—189. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陈来生, 韩睿, 祁成文. 红外热成像技术在日光温室保温性能检测中的应用[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2015, 33(1): 37—40.
- Chen Laisheng, Han Rui, Qi Chengwen. Applying infrared thermal imaging technology to detect thermal insulation performance of solar greenhouse[J]. Journal of Qinghai University: Natural Science Edition, 2015, 33(1): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨丽萍. 红外热成像法探测建筑围护结构热工缺陷研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- Yang Liping. Study on Testing Thermal Defects of Building Envelope Using Infrared Thermography[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵源萌, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于区域直方图统计的灰度图像色彩传递方法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(3): 322—326.
- Zhao Yuanmeng, Wang Lingxue, Jin Weiqi, et al. A color transfer method for colorization of grayscale image based on region histogram statistics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(3): 322—326. (in Chinese with English abstract)

## Method for measuring thermodynamic disfigurement area in Chinese solar greenhouse by utilizing thermal infrared image

Cao Yanfei<sup>1</sup>, Bao Encai<sup>1</sup>, Zou Zhirong<sup>1\*</sup>, He Bin<sup>2</sup>, Xu Wenjun<sup>3</sup>, An Kangping<sup>1</sup>, Wang Jianxiong<sup>1</sup>

(1. The Agriculture Ministry Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest, Department of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Tian Long Group Company Inner Mongolia Beilong Ecological Agriculture Technology Co., Ltd. Baotou 014010, China)

**Abstract:** The Chinese solar greenhouse is a typical greenhouse without heating system, in which the heat insulating layer and the defect of air tightness of the envelope structure are the major factors affecting insulation and heat storage performance. Compared with temperature measurement method of single point, the thermal infrared imaging technology can be used to measure the temperature of the whole area, which can be seen in the form of a color picture. Therefore, the thermal infrared imaging technology can be used as an effective method to detect temperature difference area. The purpose of this study is to develop an efficient method to detect and quantitatively analyze the area of thermodynamic disfigurement in solar greenhouse. The tested solar greenhouse, with length of 52 m and width of 8 m, locate in Yangling, Shanxi province (108°4'E, 34°16'N). The north wall of solar green house, equipped with 16 ventilation vents, was structured by clay-brick with width of 1 m and polystyrene board with width of 10 cm. E4 thermal mapper, which was perpendicular to the north wall with a distance of 1.5 m, was used to obtain infrared images of the north wall in solar greenhouse. The data that were collected in a typical sunny day (from Dec. 15, 2015, 15:30 to 16:30, the heat insulation sheet was rolled down at 16:30) were used to analyze the accuracy of different area measurement methods. FLIR Tools software was used to extract temperature data in thermal infrared image of the north wall. LabVIEW 13.0 software was used to read and select the interested infrared image area, and the corresponding temperature data were imported. Root mean square (RMS) and histogram were used to set different temperature thresholds. The measured data and calculated data from different area measurement methods were compared. The results showed that the temperature of different regions of the north wall in solar greenhouse can be displayed in the thermal infrared images, the surface temperature of the ventilation vent was lower than the inner surface temperature of northern wall, and the maximum temperature difference was up to 8.4 °C. Locations of thermodynamic disfigurement could be quickly detected and positioned. The histogram of thermal infrared image showed that the surface temperature of thermal region and the proportion of the temperature interval had a gradual increase and then a decrease after reaching the peak point, and finally a sudden increase. In these three types of the area measurement methods, histogram method showed best results with the minimum average relative error (ARE) of 5.4%, followed by manual extraction method with ARE of 6.0% and the RSM method with ARE of 11.8%. Based on these results, an efficient method for measuring the area of the thermal region in solar greenhouse was developed to quantitatively analyze the entire thermodynamic disfigurement area and the value of the heat loss in solar greenhouse, which will help the further optimization of the solar green house and supply constructive recommendations for farmers and business leaders.

**Keywords:** thermodynamics; defects; image acquisition; thermal infrared image; solar greenhouse; area measurement