



基于无人机平台的槽式集热器光学 检测系统研究

魏秀东 博士
长春理工大学

内容摘要

- 1.研究背景
- 2.测量方法及理论
- 3.测量系统硬件及软件
- 4.实验测试及误差分析
- 5.总结

一、研究背景

槽式集热器在重力、热应力及外力作用下，存在集热管弯曲变形、集热管失真空以及反射镜破损等问题，造成电站聚光集热效率降低。高效、准确的检测槽式集热器存在的光学缺陷，提高电站聚光集热效率，在槽式电站的运维中具有重要意义。



集热管弯曲



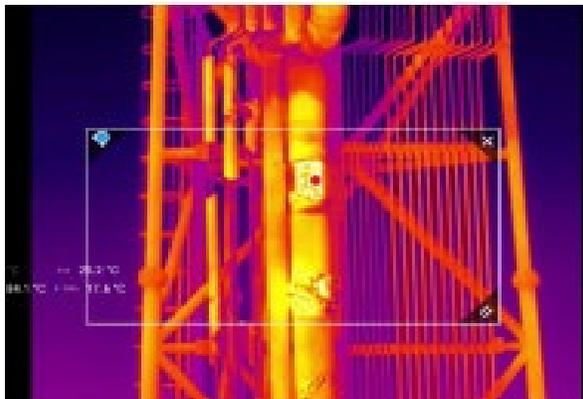
集热管弯曲+玻璃管破损



槽式聚光镜破损

一、研究背景

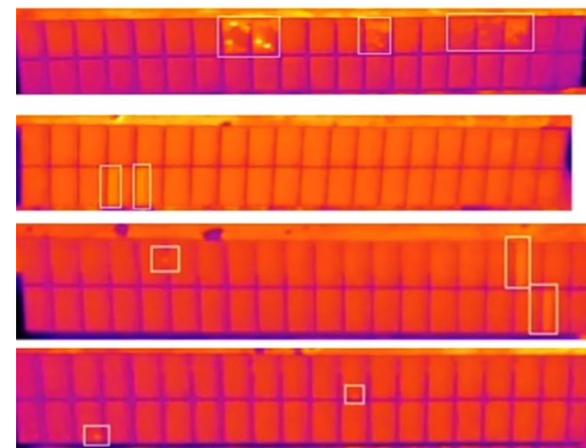
无人机搭载红外相机可对保温层、管道、高压线绝缘端子、光伏电站等进行巡检。



保温层、绝缘端子检测



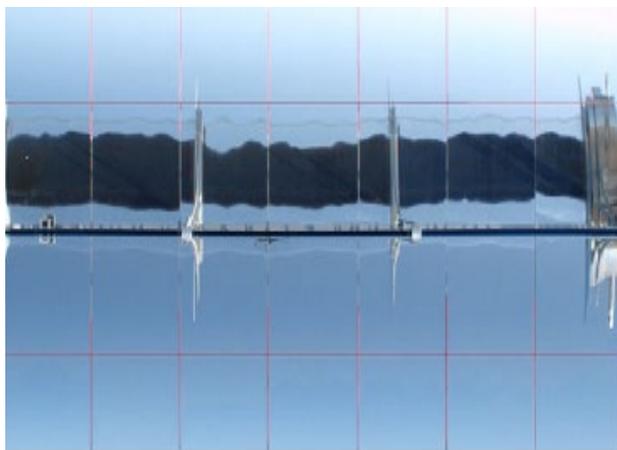
管道巡检



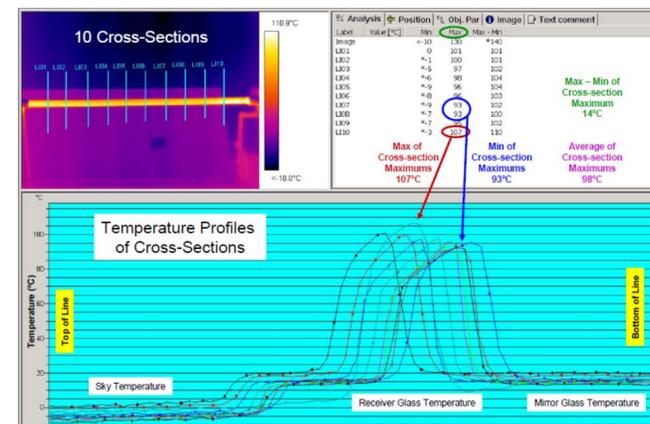
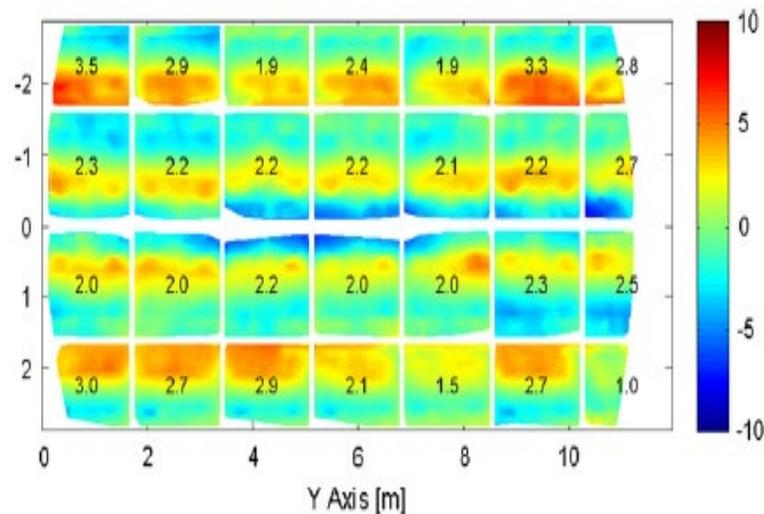
光伏电站热板巡检

一、研究背景

无人机搭载可见光相机和红外相机，可对槽式聚光器镜面面形、吸热管位置偏差、跟踪误差进行检测，对集热管表面进行红外测温。



镜面面形误差



集热管表面温度测量

如：CSP Services的Qfly检测系统

Christoph Prah et.al., Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields. Solar Energy 91 (2013) 68–78

二、测量方法及理论

为检测槽式集热器的光学缺陷，开展了基于无人机的槽式集热器光学检测系统研究。

1. 集热管弯曲测量及截断效率计算
2. 集热管表面温度测量
3. 破损反射镜检测

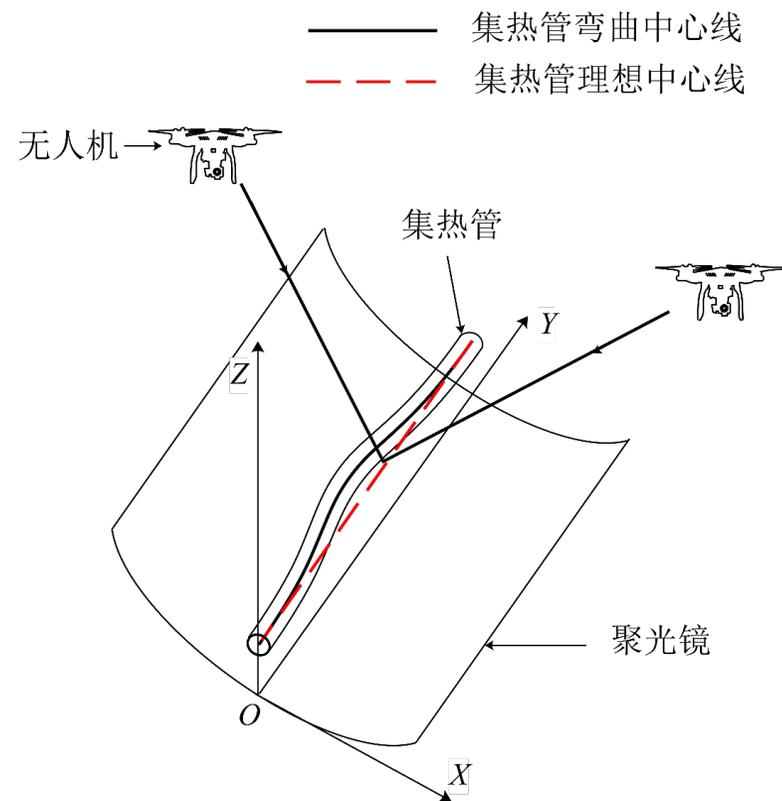


二、测量方法及理论

一) 集热管弯曲测量及截断效率计算

测量方法:

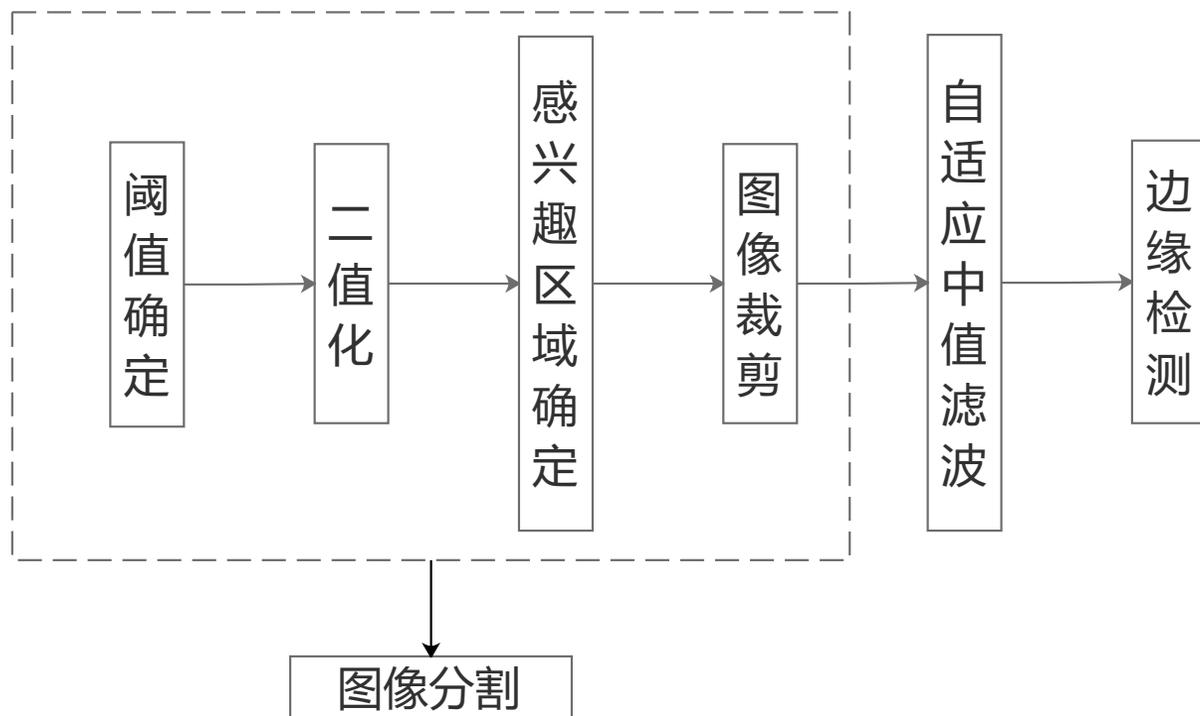
- 1) 无人机搭载高分辨可见光相机, 从相互正交的两个方向拍摄集热管图像。
- 2) 对集热管图像进行处理, 提取集热管边缘, 获得集热管弯曲量。
- 3) 将集热管弯曲量进行合成, 获得集热管总弯曲量和弯曲方向。



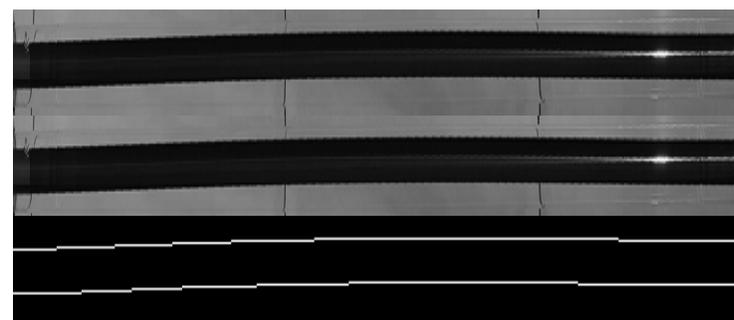
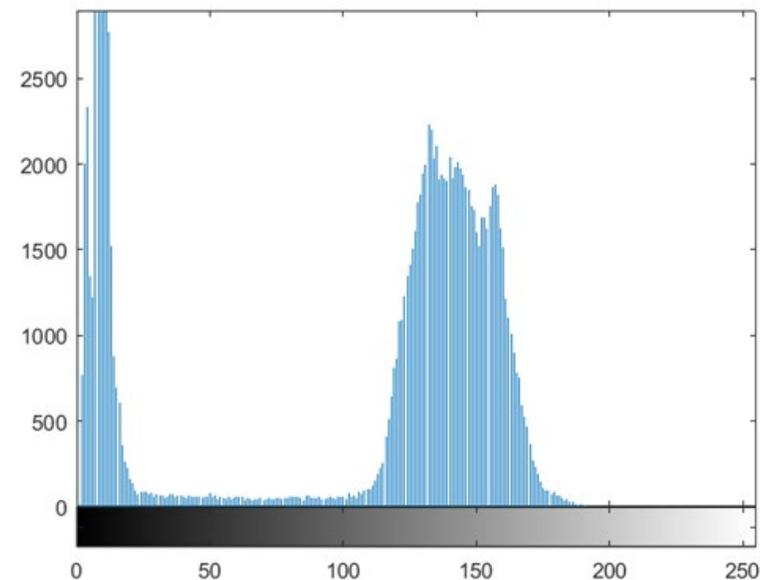
集热管弯曲测量原理示意图

二、测量方法及理论

集热管图像处理方法介绍：



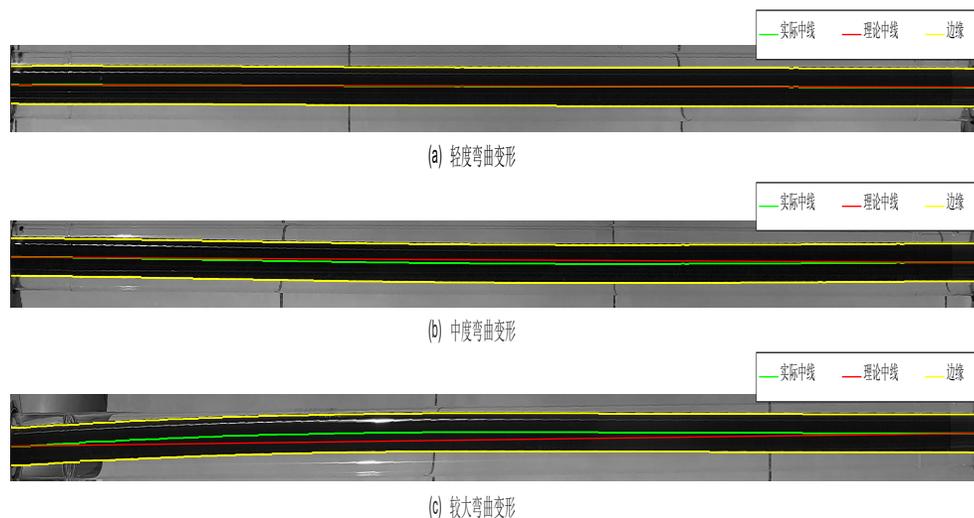
图像处理流程图



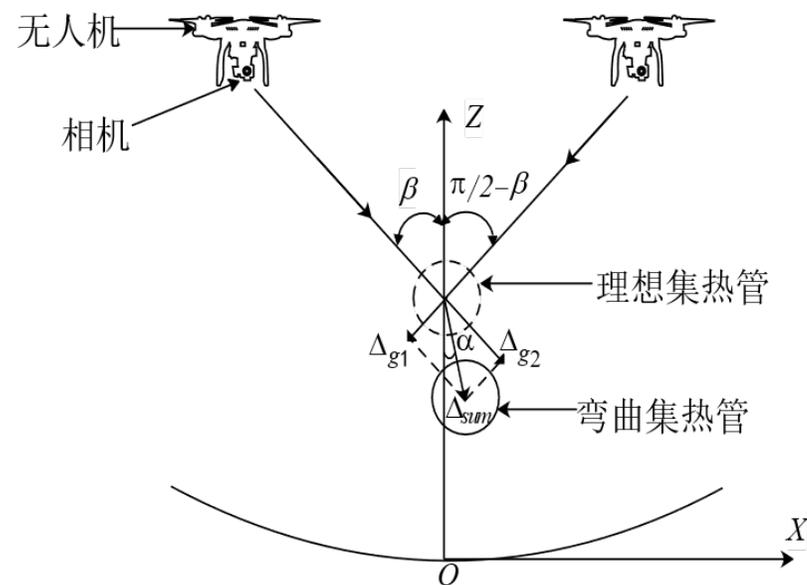
(b) 边缘检测

集热管图像边缘检测

二、测量方法及理论



通过图像处理，获取集热管边缘点坐标，得到集热管实际中心线位置，并与理想中心线位置作差，获得集热管弯曲量。

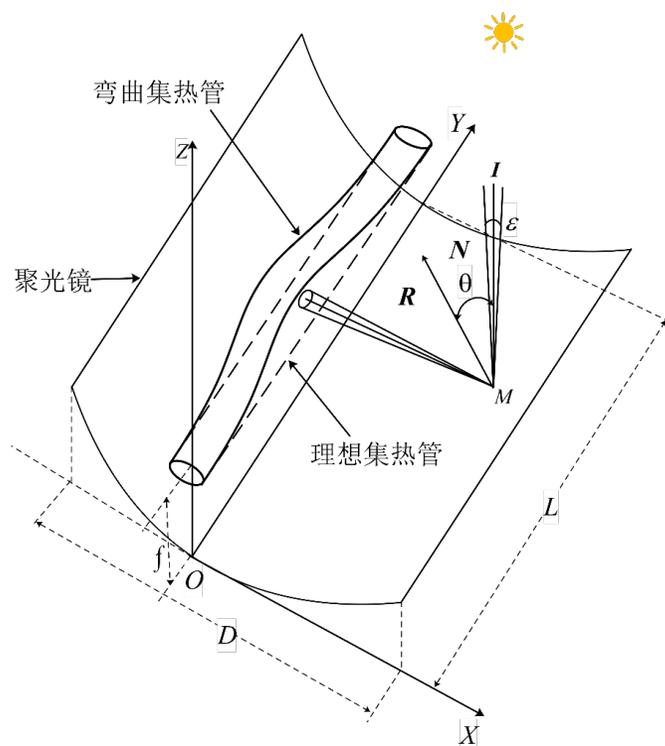


对弯曲分量进行合成，则总弯曲量 Δ_{sum} 和弯曲方向 α 为：

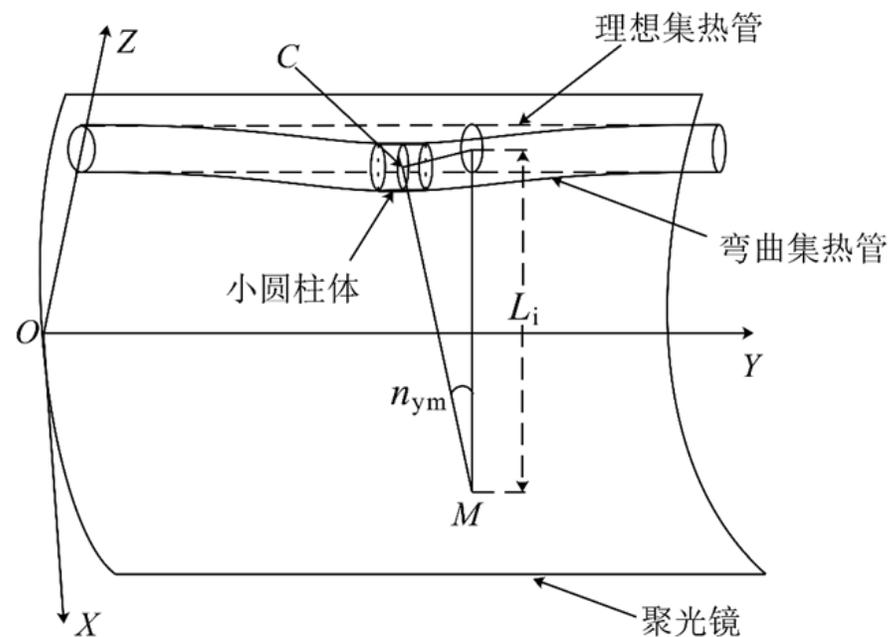
$$\Delta_{sum} = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2} \quad \alpha = \arctg(\Delta_x / \Delta_z)$$

二、测量方法及理论

弯曲集热管的截断效率计算



采用光线追迹法，计算弯曲集热管的截断效率。



将弯曲的集热管进行量化，计算追迹点反射光斑与吸热管相交的面积比

二、测量方法及理论

a) 当 $d_m \leq r_R - r_m$, $S_n = 1$

b) 当 $r_R - r_m < d_m \leq r_R$,

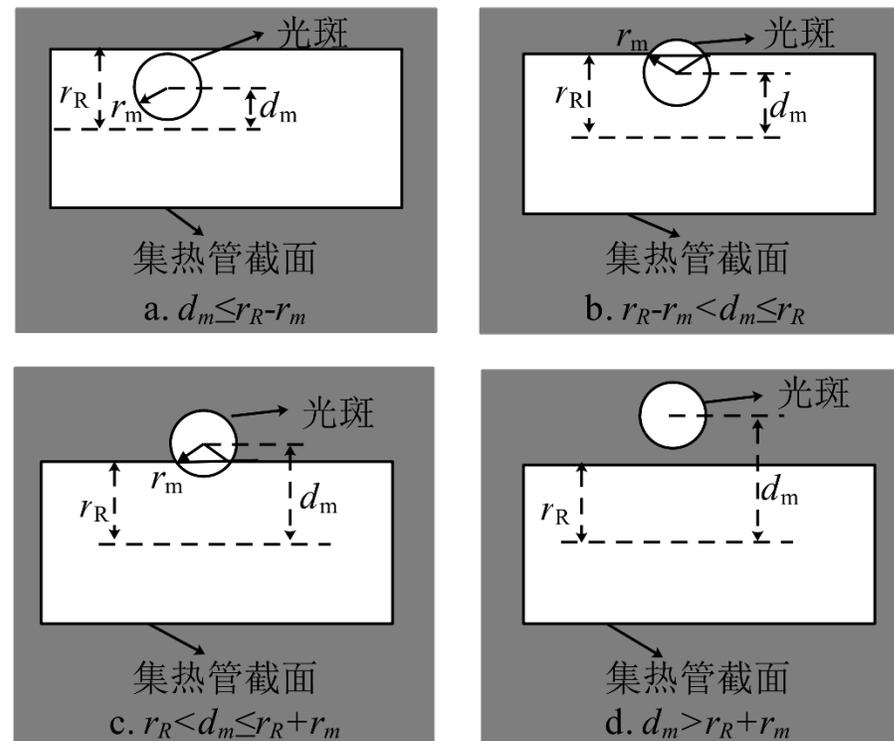
$$S_n = 1 - \frac{1}{S_m} \left[\arctg \left(\frac{\sqrt{r_m^2 - (r_R - d_m)^2}}{r_R - d_m} \right) r_m^2 + (r_R - d_m) \sqrt{r_m^2 - (r_R - d_m)^2} \right]$$

c) 当 $r_R < d_m \leq r_R + r_m$,

$$S_n = \frac{1}{S_m} \left[\arctg \left(\frac{\sqrt{r_m^2 - (d_m - r_R)^2}}{d_m - r_R} \right) r_m^2 - (d_m - r_R) \sqrt{r_m^2 - (d_m - r_R)^2} \right]$$

d) 当 $d_m > r_R + r_m$, $S_n = 0$

截断效率: $\eta = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_n(i, j)}{mn} \right) \times 100\%$



光斑与集热管截面位置关系

二、测量方法及理论

二) 集热管表面温度测量—基于红外热成像

温度为T的黑体的辐射亮度为:

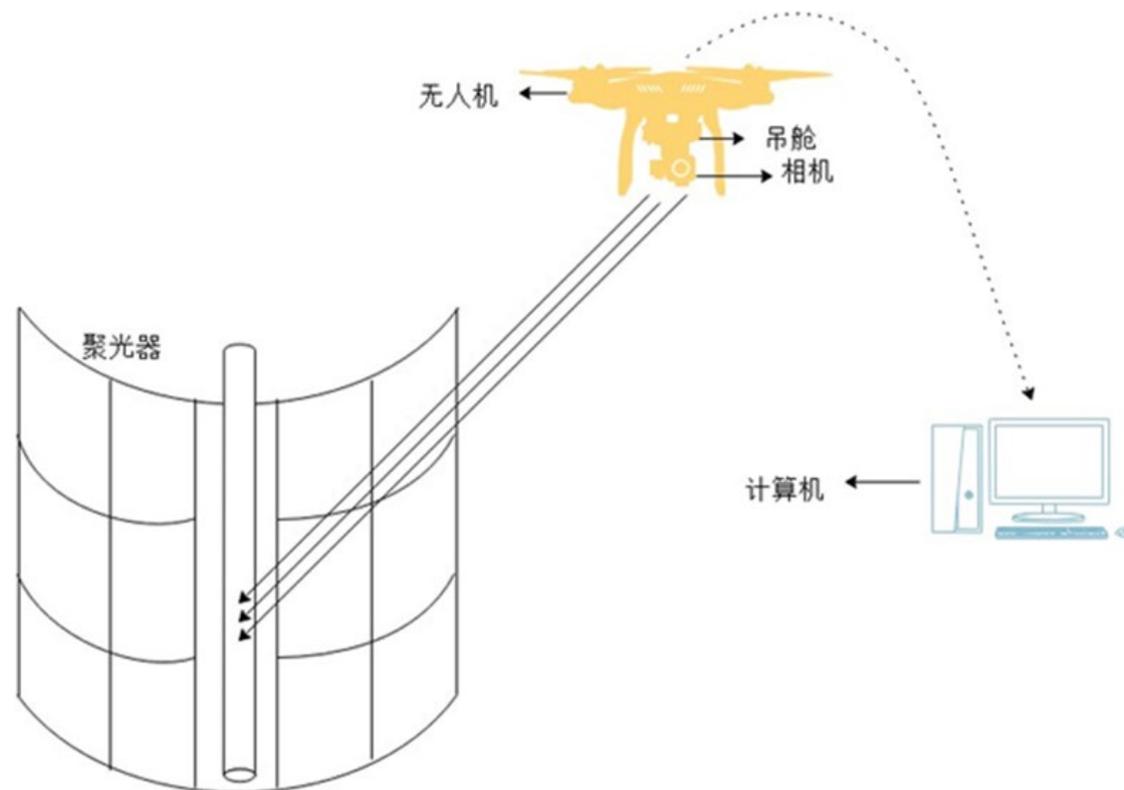
$$W(T) = \sigma T^4 / \pi$$

温度为T的普通物体辐射亮度为:

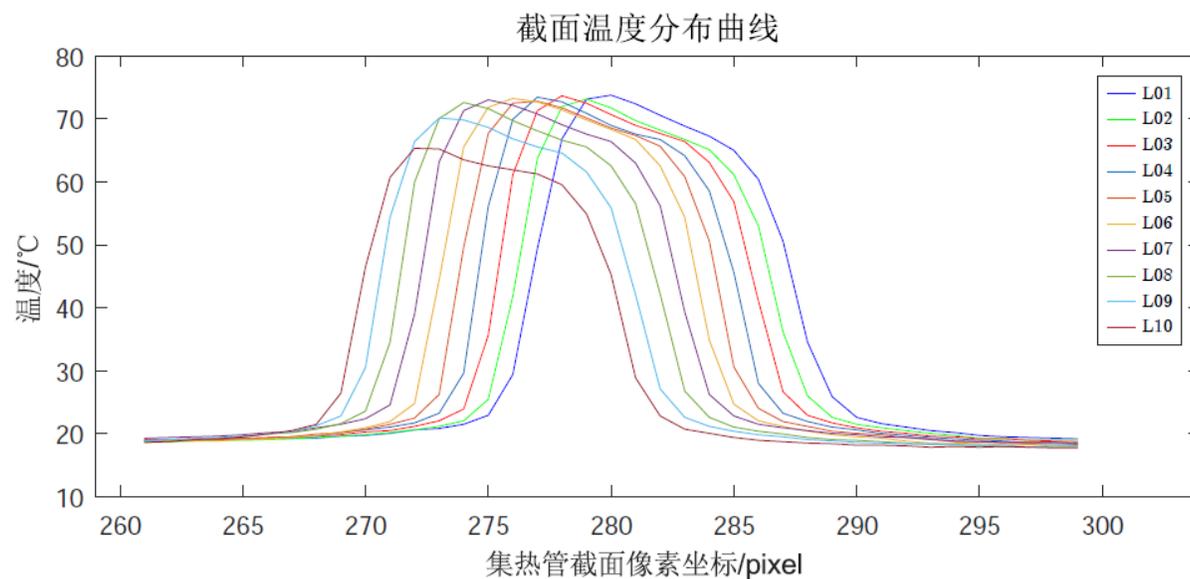
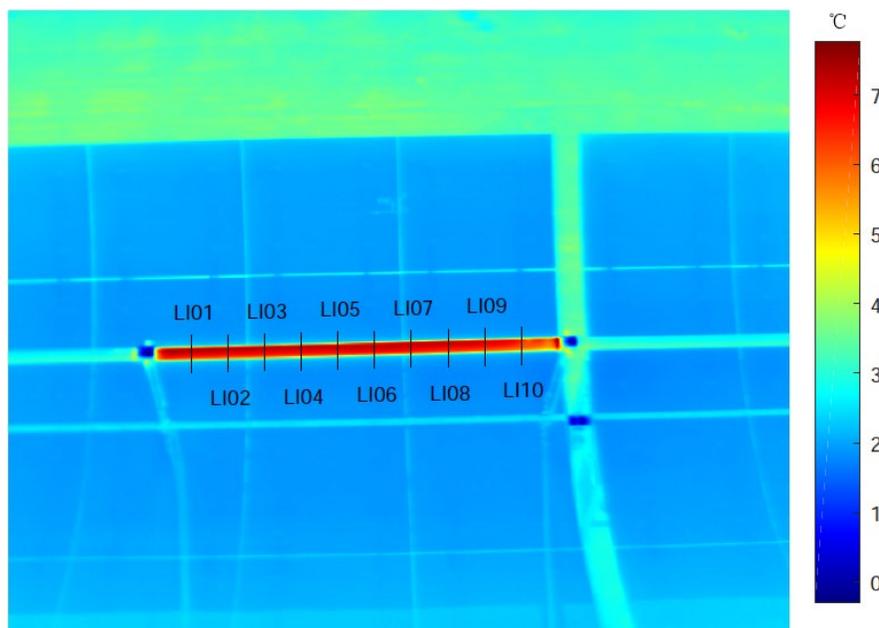
$$L(T, \theta) = \varepsilon(T, \theta) \cdot W(T)$$

其中, $\varepsilon(T, \theta)$ 表示物体发射率

影响测温准确性的主要因素: 物体发射率、透过率、背景温度。



二、测量方法及理论



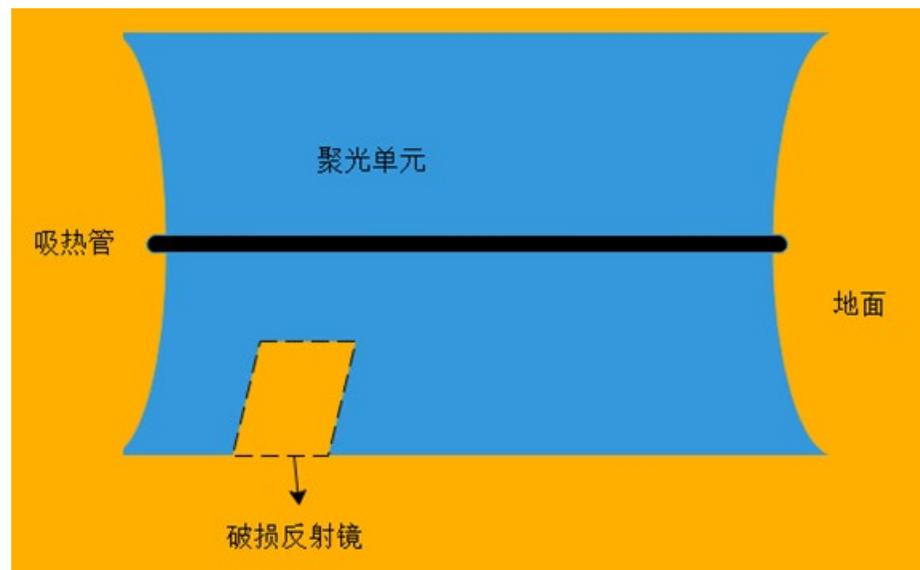
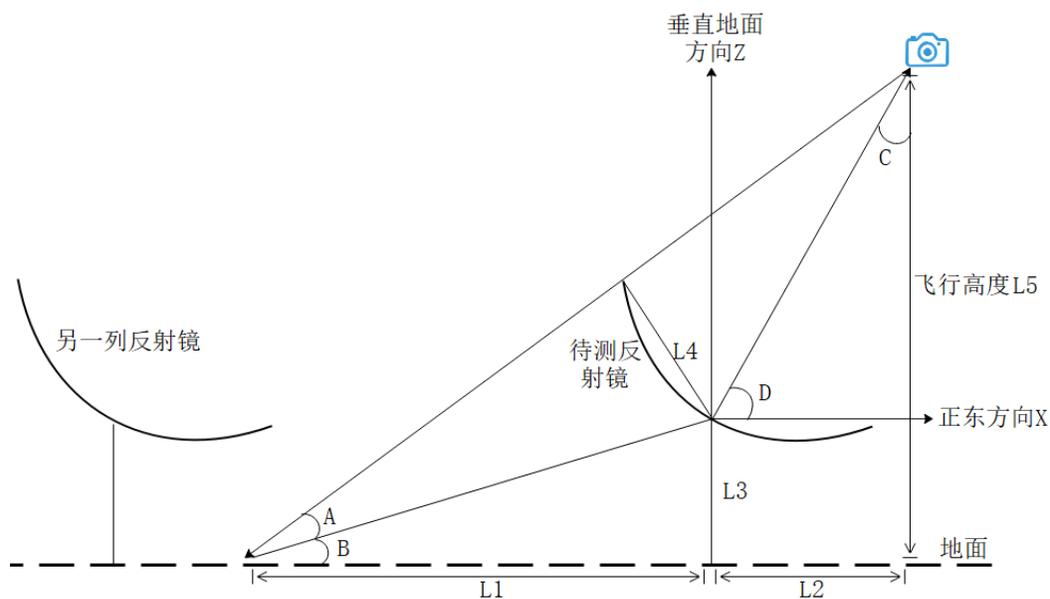
提取集热管红外温度图像，采集
10组集热管截面的温度数据

对温度数据进行分析，判断集热管是否超温

二、测量方法及理论

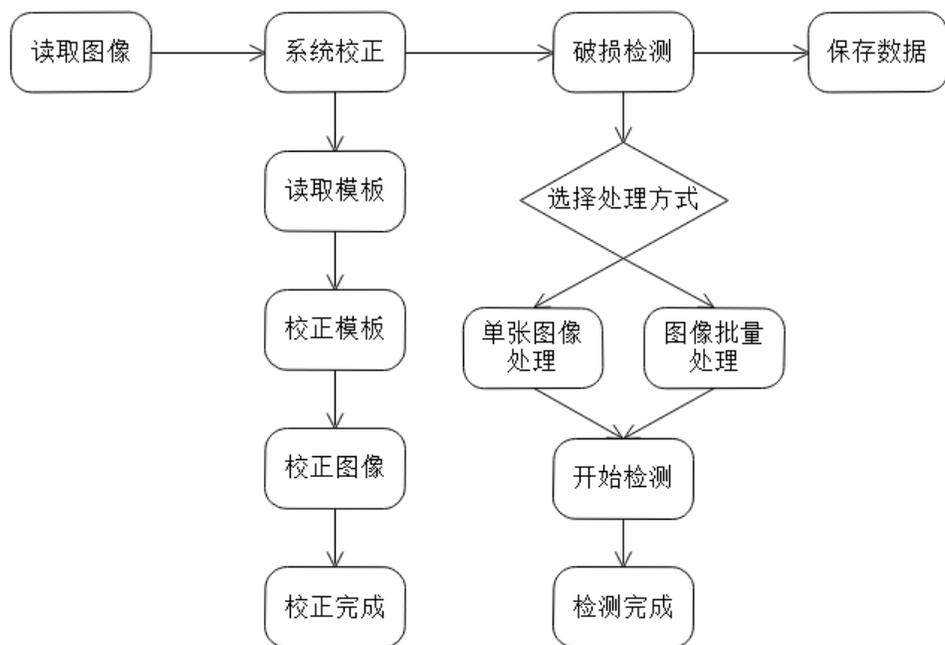
三) 破损反射镜测量

测量方法：完好反射镜对应位置反射天空背景图像，破损反射镜对应位置的图像背景为地面，图像差别明显，通过图像识别，可获取破损反射镜位置。

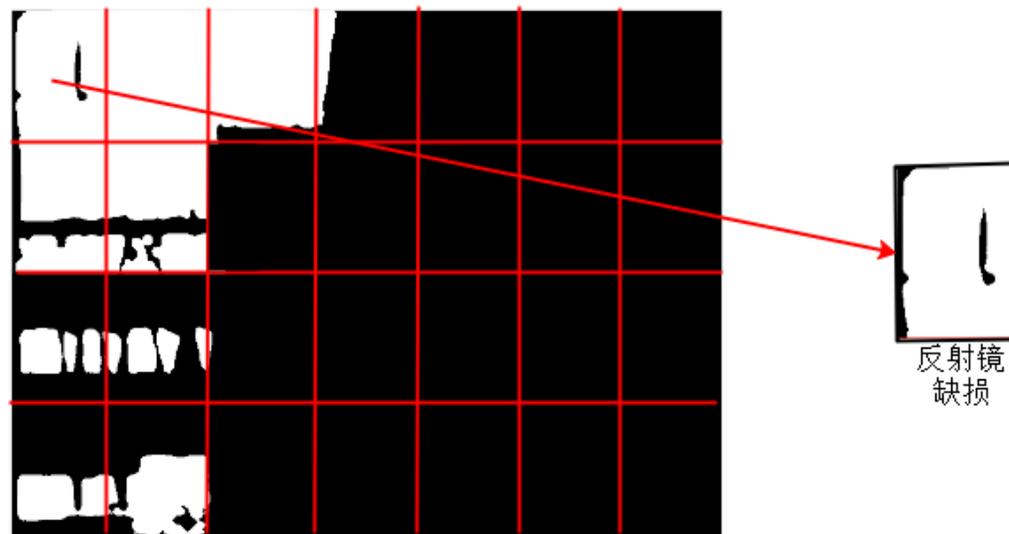


二、测量方法及理论

破损反射镜检测图像处理流程



反射镜破损检测图像处理流程

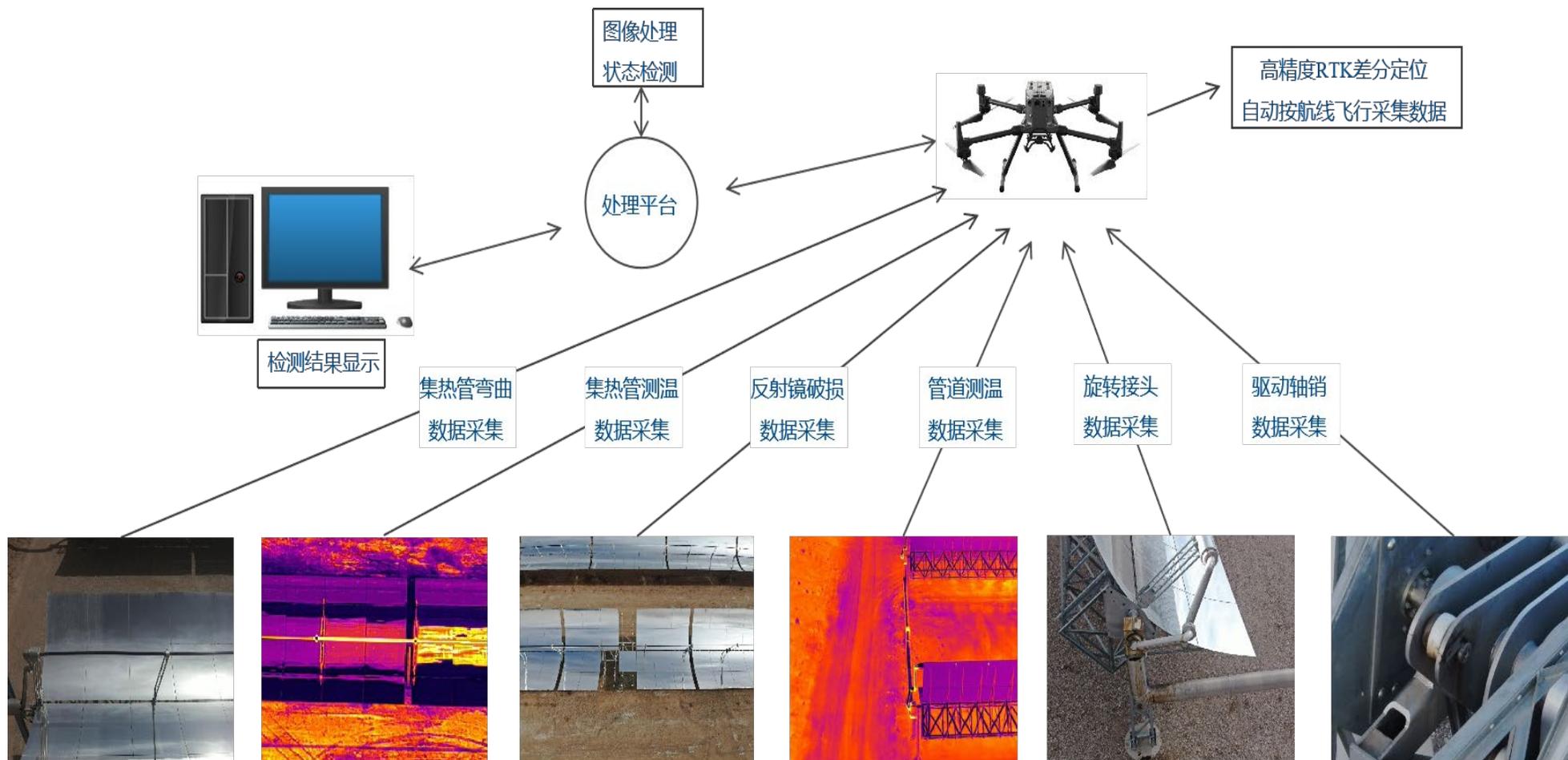


聚光单元图像分割

图像二值化处理

三、测量系统硬件及软件

槽式集热器光学检测系统硬件主要包括：无人机、高分辨可见光相机、红外相机。



三、测量系统硬件及软件



大疆经纬300无人机



高分辨可见光相机



可见光与红外一体相机

三、测量系统硬件及软件

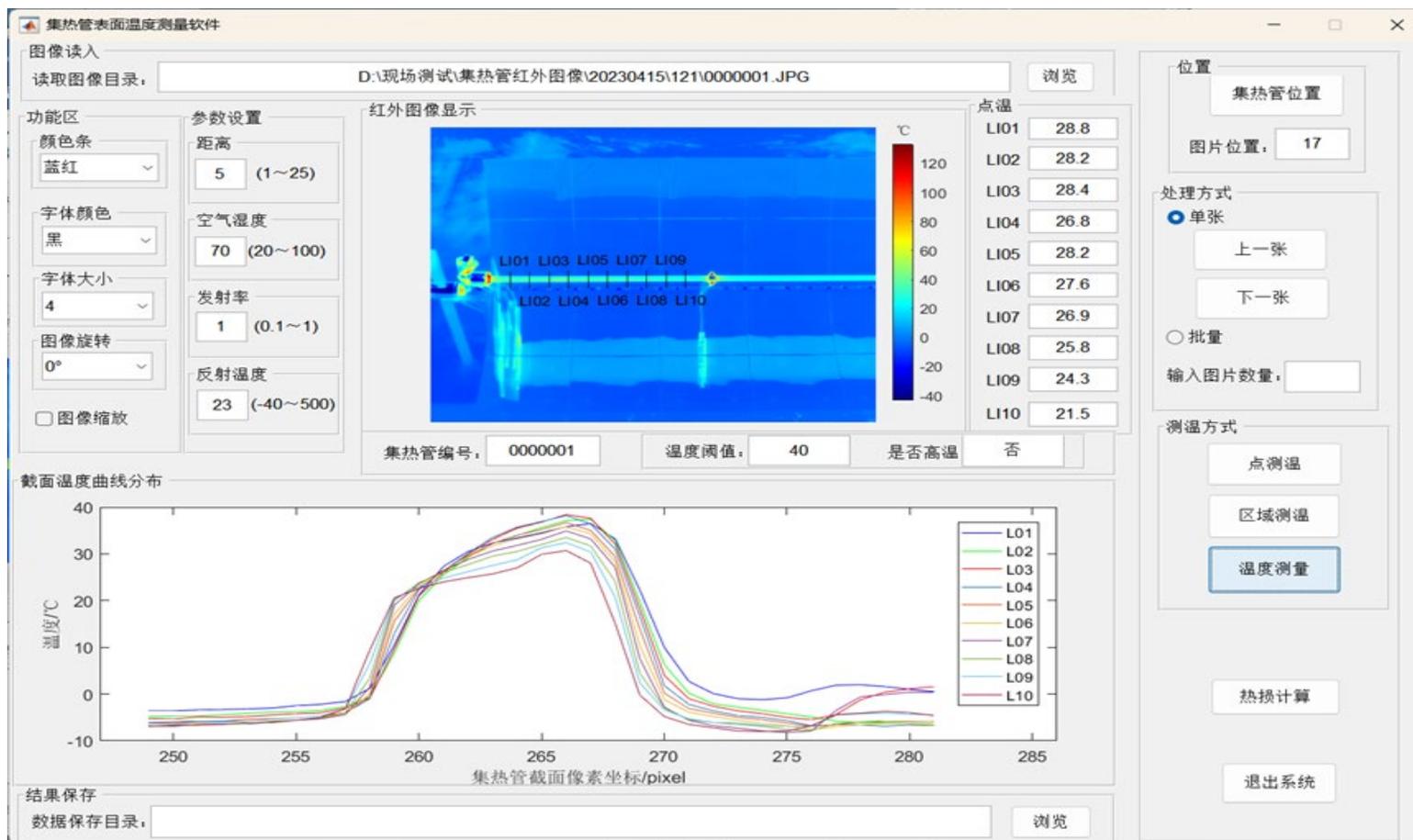
集热管弯曲测量软件



集热管弯曲测量软件

三、测量系统硬件及软件

集热管表面温度测量及热损计算软件



集热管表面温度测量软件

三、测量系统硬件及软件

反射镜破损检测软件

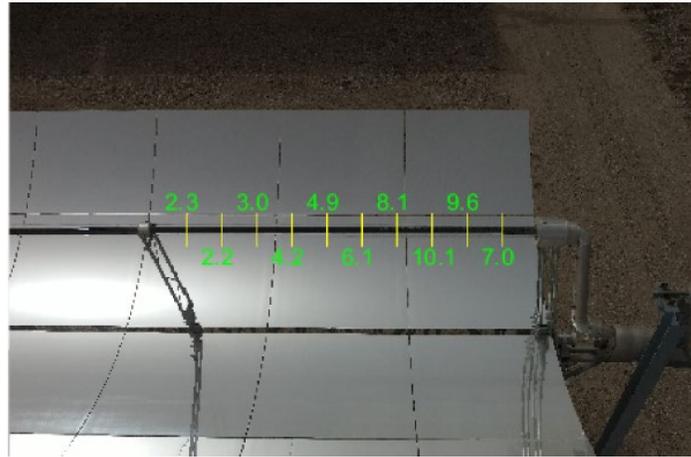
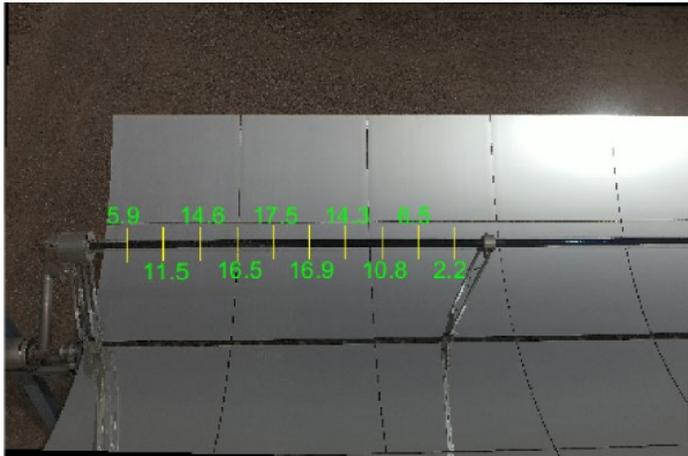


反射镜破损检测软件

四、实验测试及误差分析

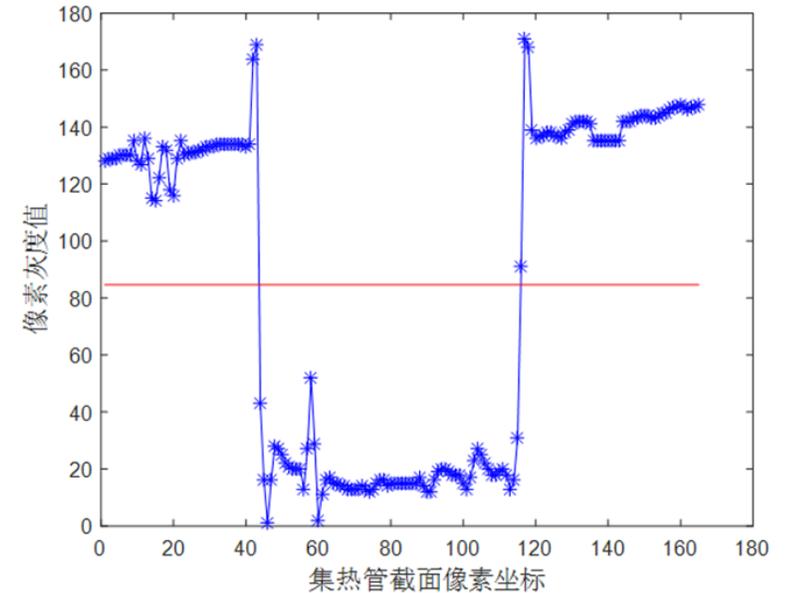
一) 集热管弯曲测量实验

测量误差主要由镜头畸变和图像处理引入，通过畸变校正消除镜头畸变的影响，图像处理存在1~2个像素误差，像素对应的空间尺寸为0.62mm，因此，总测量误差小于1.24mm。



45° 方向集热管弯曲测量

135° 方向集热管弯曲测量



集热管截面灰度分布

最终弯曲量及拦截率

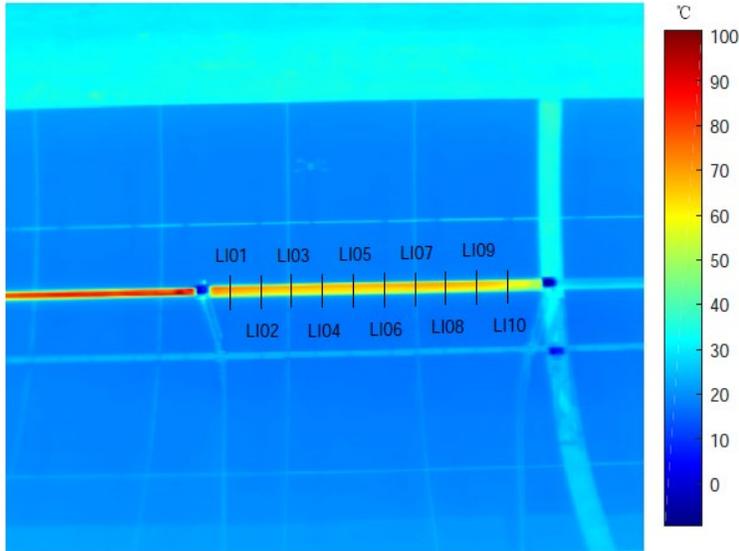
	点1	点2	点3	点4	点5	点6
1	9.1500	14.9800	17.7600	18.3500	18.5400	17.6100
	点7	点8	点10	点10	弯曲方向/°	拦截率/%
2	14.8500	11.1800	6.8500	3.1800	79.7400	92.6800

四、实验测试及误差分析

二) 集热管表面温度测量实验

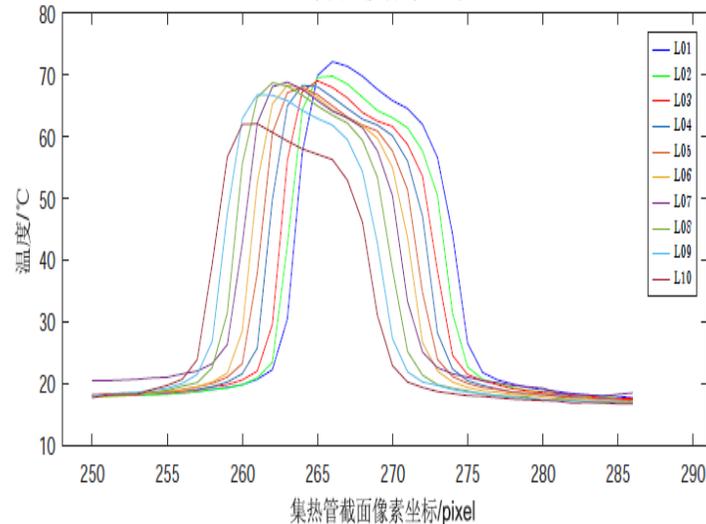
将无人机红外测温系统的测温结果与手持红外测温仪、热电偶测温仪的测温结果进行比较，温差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内。

红外图像



集热管红外图像

截面温度分布曲线



集热管截面温度分布

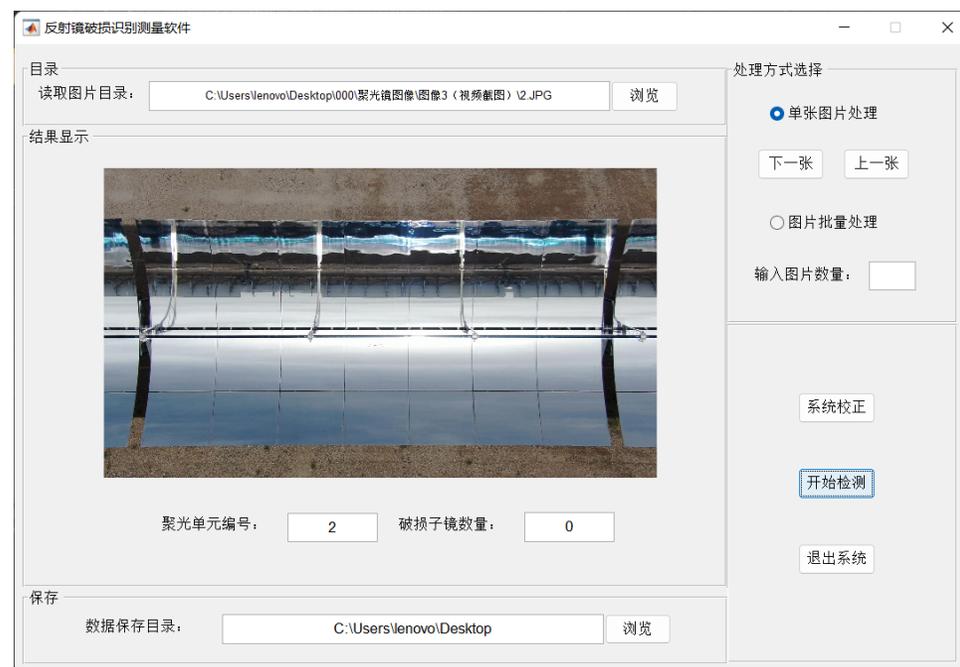
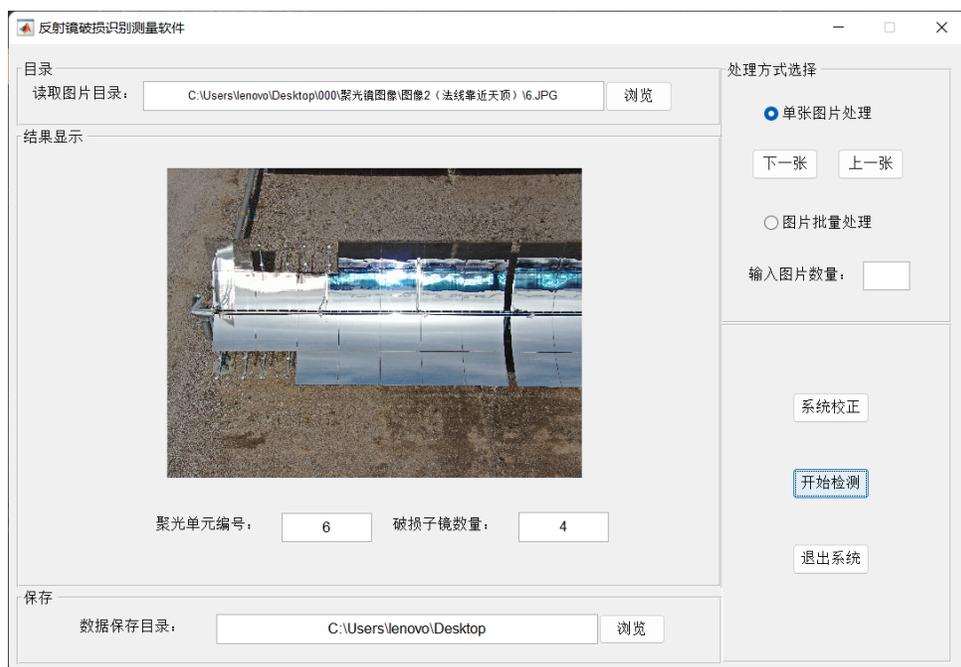


使用手持测温仪进行测温

四、实验测试及误差分析

三) 破损反射镜测量实验

进行聚光器反射镜破损检测实验，经验证：破损反射镜检测正确率 $>95\%$ ，检测正确率与天空背景和聚光器清洁度有关。当天空云较多时或聚光镜表面灰尘较厚时，会增加误判的概率。



五、总结

- 研究了基于无人机平台的槽式集热器光学检测方法，包括集热管弯曲测量、集热管表面红外测温 and 破损反射镜检测。
- 研制了无人机槽式集热器光学检测平台，编写了槽式集热器光学检测软件，能够对集热器光学缺陷进行快速、准确检测，提高了检测效率。
- 实验验证了槽式集热器无人机光学检测系统的测量准确性，结果表明：集热管弯曲检测误差为1.24mm，红外测温误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，反射镜破损测量准确率为 $>95\%$ 。

谢谢聆听！

欢迎批评指正