光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060902

红外点元探测器扫描成像方法研究

代少升*，吴　帅，贺自强，舒鹏宇，马　翀，刘子恩

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对传统红外面阵探测器成像存在分辨率低、视场范围窄、非均匀性的问题，提出一种基于红外点元探测器的扫描成像方法。该方法首先利用微型电机驱动扫描镜依次获取物体表面的红外热斑，经光学镜头聚焦到红外点元探测器，进行光电转换；然后经信号处理板采集、处理后生成红外灰度图像；最后利用多阈值分割的伪彩色映射模型，将灰度图像转换成伪彩色图像。实验结果表明：红外点元探测器扫描成像方法能够实现红外场景的大视场、高分辨率成像，且点元探测器加工制造简单，价格低廉，有效突破了传统大面阵成像的高昂成本限制，更加有利于红外成像技术的推广和应用。

关键词： 面阵探测器；大视场；红外点元探测器；扫描；伪彩色

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0923－07

Research on Infrared Point Element Detector Scanning Imaging Method

DAI Shaosheng, WU Shuai, HE Ziqiang, SHU Yupeng, MA Chong, LIU Zien

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: Aiming at the problems of low resolution, narrow field of view and non-uniformity of traditional infrared array detector, a scanning imaging method based on infrared point detector was proposed. Firstly, a scanning mirror driven by a micro motor was used to obtain the infrared hot spots on the surface of the object, which were converged to the infrared point detector through the optical lens. Then the signal processing board collected and processed them to generate infrared grayscale image. Finally, a multi threshold segmentation pseudo-color mapping model was used to transform grayscale image into pseudo-color image. The experimental results show that the infrared point detector scanning imaging method can realize the large field of view and high-resolution imaging of the infrared scene, and the point detector has the advantages of simple manufacturing process and low cost. It effectively breaks the limitations of technical and cost constraints of the large planar array detector in the traditional high-resolution imaging system, and is more conducive to the promotion and application of the infrared imaging technology.

Key words: area array detector; large field of view; infrared point element detector; scanning; pseudo-color

0　引言

红外测温已广泛应用于工业、医学、航天遥感等多个领域，红外热图像在分析自然温度分布、排查安全隐患等应用领域发挥着重要作用。传统红外成像系统的红外焦平面阵列(IRFPA)主要由 HgCdTe，InSb，VO_x 等材料制成[1]，其成像存在分辨率低、视场范围窄、非均匀性等问题。非均匀性是指在同等

收稿日期：2022－06－09.

*通信作者：代少升　E-mail：daiss@cqupt.edu.cn

强度红外辐射下，探测器的各个像元的输出响应率不同；分辨率是指图像中可辨认的临界物体空间几何长度的最小极限，即对细微结构的分辨率；视场是指当热像仪位置固定时，所能观察到的最大空间角度范围。对于大平面阵探测器或长线阵探测器的高分辨率成像系统，因其价格非常昂贵，难以获得广泛应用。

针对以上问题，本文提出一种红外点元探测器扫描成像方法，该方法利用微型电机驱动扫描镜依次获取物体表面的红外热斑，经光学镜头汇聚、红外点元探测器光电转换后，再经信号处理板采集、处理生成红外灰度图像；最后利用多阈值分割的伪彩色映射模型，将灰度图像转换成伪彩色图像。该方法利用红外扫描方法获取物体表面不同位置的热辐射信号，从而实现红外目标多像素成像，以降低传统红外大面阵成像系统的研制成本。

通过实验数据分析，红外点元探测器扫描成像方法能够实现红外场景的大视场、高分辨率成像，且点元探测器加工制造工艺简单，成本低廉，有效突破了传统高分辨率成像系统中大平面阵探测器的加工工艺和成本限制，同时系统提供直观可视化图像效果，能够显示每个像素点的温度值，并实现高温点实时跟踪，有利于红外成像技术的推广和应用。

1 系统构成及工作原理

1.1 系统构成

一切绝对温度高于零的物体都会向外界辐射不同强度的红外能量，通过探测器接收目标辐射的能量来确定目标的温度。红外点元探测器扫描成像系统由扫描仪、数据传输模块和上位机软件三部分构成，系统结构如图 1 所示。扫描仪实现对数据采集和控制功能，机械扫描实现大视野多点温度的获取，上位机对温度数据和位置数据进行解析和处理，得到二维红外热图像[2]。

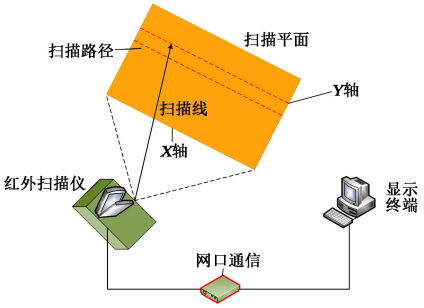


图 1 红外扫描成像系统示意图

扫描仪主要由光学镜头、聚焦镜头、滤光片、红外点元探测器、一维驱动电机、二维驱动电机、仪器箱、连接轴以及 DSP 处理器组成，扫描仪结构如图 2 所示[3]。入射光经过光路窗口进入扫描仪，反射镜面将入射光反射在滤光片上，入射光再经过滤光片过滤只保留近红外光，最后聚焦镜头将近红外刚好打在点元探测器上。

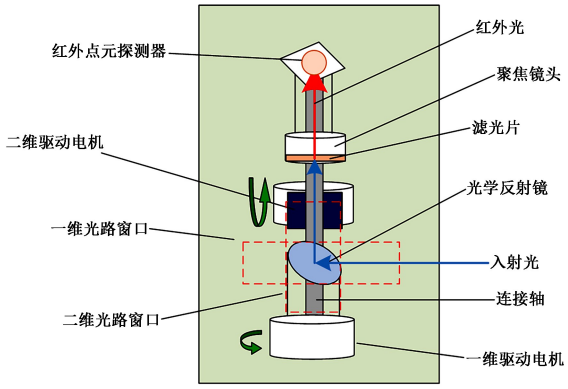


图 2 扫描仪结构

1.2 系统工作原理

利用微型电机驱动光学反射镜面匀速旋转依次获取物体表面的红外热斑，经聚焦镜头汇聚到红外点元探测器。探测器将待测目标的辐射能量转化为电流信号，再经过 I/V 转化电路和放大电路得到最终的电压信号。核心处理器采用 DSP 对电压幅度进行采集得到 ad 值。采集后的 ad 值经过温度映射模型转换成温度，通过网口将该温度数据传输到上位机。上位机软件先将温度转化为灰度图像，再利用多阈值伪彩映射算法将灰度图像转化为二维彩色图像，并在终端进行显示[4-5]。红外图像获取流程如图 3 所示。

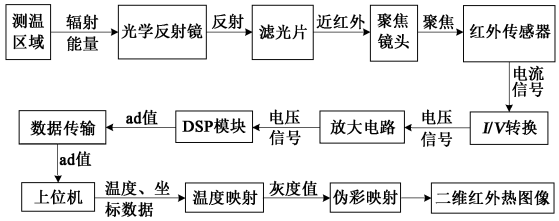


图 3 红外图像获取流程

2 扫描方法

2.1 扫描方法

2.1.1 一维线扫描

一维驱动电机采用微型高速电机，轴上安装一块光学反射镜，入射红外光信号经过反射、滤光后聚

焦到红外探测器上。利用点动成线的原理，通过电机延水平方向匀速旋转，完成一行数据点的采集，调节电压控制微型直流电机在负载状态下的转速，每行采集多个像素点[6]。为防止周围物体辐射对测量精度的影响，在结构上制作了一维扫描窗口，扫描窗口对应一定的扫描角度，在扫描完一行温度数据后，将数据上传一次。一维扫描的主要技术指标如表 1 所示。

表 1　一维(*X* 轴)扫描技术指标

扫描方式	一维(*X* 轴)扫描
扫描频率/(线/秒)	10～50
取样点数/(点/线)	512～2 048
视场角/(°)	90～135
线响应时间/ms	20～100
窗口尺寸/cm^2	5×24
工作温度/℃	＜75

2.1.2　二维扫描

利用线动成面的原理，在一维线扫描的基础上，加上纵向运动分量。二维扫描驱动采用大力矩、高精度、数字舵机实现。数字舵机的控制脉冲周期 20 ms，脉宽 0.5～2.5 ms，对应 0°～180°位置。采用舵机是 45°～135°范围，对应脉宽为 1～2 ms，通过不断调节脉冲占空比使舵机缓慢且稳定地转动[7]。图 4 中连接轴保证红外探测器、聚焦镜头、光学镜头、一维驱动电机、一维光路窗口是一个整体，可由二维驱动电机整体驱动扫描。二维扫描带动一维线扫描结构整体延垂直方向旋转，每次调节脉宽增加 1 μs，实现 1 000 行数据采集，共采集 10^6 个数据点，以此获取大视野，继而完成整个平面的数据采集。为防止周围物体辐射对测量精度的影响，在结构上制作二维扫描窗口，扫描窗口对应的扫描角度为 90°。二维扫描的主要技术指标如表 2 所示。

一维扫描电机和二维扫描电机联调时，要保证两个电机同步。判断一维扫描电机一行数据采集完，未进行下一行数据扫描前，二维扫描电机改变一次角度。以 90°视场角为例，由脉宽占空比可算出每次旋转 0.09°。在二维扫描电机旋转到 135°时，等待本次一维扫描结束，数据上传成功后，一维电机和二维舵机复位回到起始角度再开始下一次扫描[8-9]。

表 2　二维(*Y* 轴)扫描技术指标

扫描方式	二维(*Y* 轴)扫描
扫描频率/(行/秒)	12.5
扫描行/行	1 000
视场角/(°)	60～90
每次扫描角度/(°)	0.09
线响应时间/ms	40～100
窗口尺寸/cm^2	24×24
工作温度/℃	＜75

机械扫描采用等角度扫描原理，故二维平面上采样点分布在横轴和纵轴上分布都是非均匀的，红外传感器二维面扫描结构如图 4 所示，其中 α 为扫描线沿 Y 轴方向转动的角度，β 为扫描线沿 X 轴方向转动的角度，扫描仪位于扫描平面对角线中线上，且距离扫描平面距离为 H，扫描平面为正方向，不难算出 H 为 $L/2$。根据采样点个数计算出各采样点坐标，如式(1)所示。

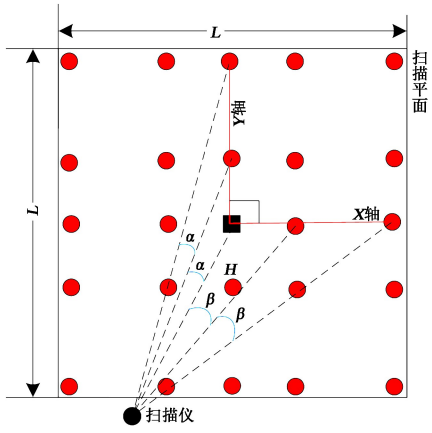


图 4　二维平面采样示意图

$$
\begin{aligned}
X\text{ 轴坐标}&\begin{cases} space_i = h \times \left[1-\tan\left(\dfrac{\pi}{4}-(i-1)\times\dfrac{\pi}{2\times N}\right)\right], i=1,2,\cdots,\dfrac{N-1}{2} \\ space_i = h \times \left[1+\tan\left(\dfrac{\pi}{2}-(i-1)\times\dfrac{\pi}{2\times N}\right)\right], i=\dfrac{N+1}{2},\dfrac{N+3}{2},\cdots,N+1 \end{cases} \\
Y\text{ 轴坐标}&\begin{cases} space_j = h \times \left[1-\tan\left(\dfrac{\pi}{4}-(j-1)\times\dfrac{\pi}{2\times M}\right)\right], j=1,2,\cdots,\dfrac{M-1}{2} \\ space_j = h \times \left[1+\tan\left(\dfrac{\pi}{2}-(j-1)\times\dfrac{\pi}{2\times M}\right)\right], j=\dfrac{M+1}{2},\dfrac{M+3}{2},\cdots,M+1 \end{cases}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

以扫描平面左上顶点为起始坐标，以每行 1 000 个采样点为例，式中 N 为 999，M 为 999，即当在扫描平面 X 轴上进行 1 000 次采样时，X 轴被分为了 999 段，$space_i$ 为 X 轴上第 i 个采样点的横坐标；当

在扫描平面 Y 轴扫描时，同理，$space_j$ 为 Y 轴上第 j 个采样点的纵坐标。

2.2 温度场重建方法

2.2.1 伪彩映射处理流程

上位机接收到的图像为黑白灰度图像，动态范围有限，人眼对灰度变化区分度很低，很难依据灰度值判断自然温度场的分布[10]。人眼对彩色分辨率的区分远高于灰度图，因此对灰度图像进行伪彩色，对 0～255 的灰度值进行分割，不同的灰度值代表不同的温度，用不同的颜色表示，是一种有效的图像增强算法，可以直观、清晰的看出自然温度分布情况。二维热图像通过提取单个监测点数据，解析出坐标值和温度值，根据坐标值和温度值在检测软件上绘制热图像点，待所有监测点绘制完毕则一幅完整二维热图像绘制完成[11]。二维热图像的数据处理过程如图 5。

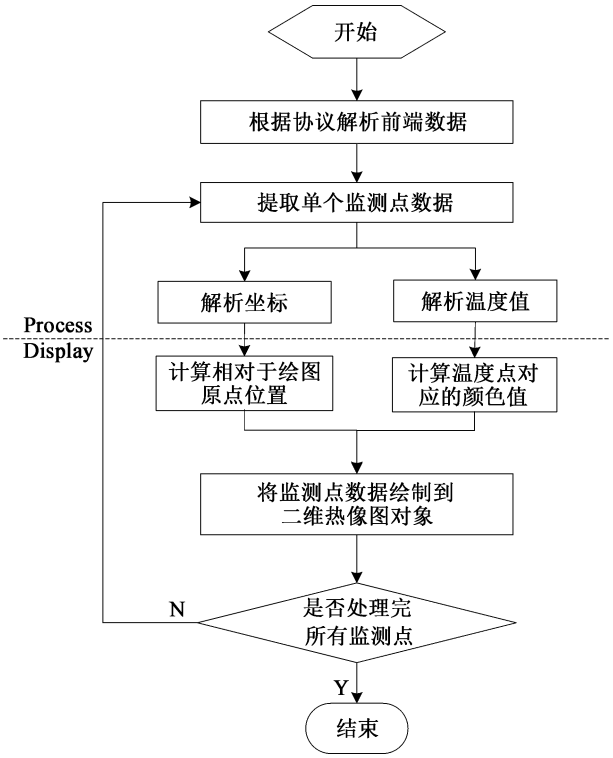


图 5 二维热图像的数据处理过程

2.2.2 基于多阈值分割的彩虹编码

传统彩虹编码是对 0～255 的灰度值进行固定的分割，大多数红外灰度图像的灰度值变换范围小、对比度低，大部分的背景都是处在低灰度值区域，那么经过彩虹编码映射出来的伪彩图像层次感低、边缘模糊，无法将图像的有用信息提取出来。所以针对传统彩虹编码阈值固定的局限性，提出多阈值分割算法的伪彩处理函数如下：

$$R(x,y)=\begin{cases}0, & l_0\leqslant f(x,y)<l_2\\ 255\times[f(x,y)-l_2]/(l_3-l_2), & l_2\leqslant f(x,y)<l_3\\ 0, & l_3\leqslant f(x,y)\leqslant l_4\end{cases} \tag{2}$$

$$G(x,y)=\begin{cases}0, & l_0\leqslant f(x,y)<l_1\\ 255\times[f(x,y)-l_1]/(l_2-l_1), & l_1\leqslant f(x,y)<l_2\\ 255, & l_2\leqslant f(x,y)<l_3\\ 255\times[f(x,y)-l_3]/(l_4-l_3), & l_3\leqslant f(x,y)\leqslant l_4\end{cases} \tag{3}$$

$$B(x,y)=\begin{cases}255\times[f(x,y)-l_0]/(l_1-l_0), & l_0\leqslant f(x,y)<l_1\\ 255\times[f(x,y)-l_1]/(l_1-l_2), & l_1\leqslant f(x,y)<l_2\\ 0, & l_2\leqslant f(x,y)\leqslant l_4\end{cases} \tag{4}$$

$R(x,y)$，$G(x,y)$ 和 $B(x,y)$ 是变换后的红、绿、蓝三基色，$f(x,y)$ 是图像在 (x,y) 处像素的灰度值。l_0，l_1，l_2，l_3 和 l_4 为图像分割中的阈值，求取方法采用多阈值最大类间方差算法。

多阈值最大类间方差法，设有 k 个阈值：

$$\omega(t_1,t_2,\cdots,t_k)=n_0n_1(u_0-u_1)^2+n_0n_2(u_0-u_2)^2+\cdots+n_0n_k(u_0-u_k)^2+n_1n_2(u_1-u_2)^2+n_1n_3(u_1-u_3)^2+\cdots+n_1n_k(u_1-u_k)^2+\cdots+n_{k-1}n_k(u_{k-1}-u_k)^2 \tag{5}$$

其中，

$$n_{j-1}=\sum_{i=t_{j-1}+1}^{t_j}h(i) \tag{6}$$

$$u_{j-1}=\frac{\sum_{i=t_{j-1}+1}^{t_j}i\times h(i)}{n_{j-1}} \tag{7}$$

且 $1\leqslant j\leqslant k+1$，最佳阈值 $(t_1,t_2,\cdots,t_k)=\mathrm{ArgMax}(\omega(t_1,t_2,\cdots,t_k))$ 使得总方差取得最大值[12]。

彩虹编码的多阈值的求解方法，式(2)～(4)共有 5 个阈值，即 l_0，l_1，l_2，l_3 和 l_4。首先，对红外灰度图像进行灰度值分析，将图像最小灰度值赋值给 l_0，图像最小灰度值赋值给 l_4，利用多阈值最大类间方差法计算出最佳阈值，赋给 l_1，l_2 和 l_3。将 5 个阈值代入式(2)～(4)，则可实现多阈值分割的伪彩映射。

3　测试与结果分析

本实验基于实验室自主研发的红外点元探测器扫描成像系统；采用 EASIR 公司 9 代红外成像仪(EASIR-9)与自主研发系统对比；使用武汉凯尔文光电有限公司生产的高温黑体来模拟目标辐射源。

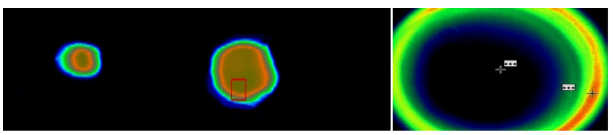
详细实验步骤如下：

a)调整两台高温黑体位置，使发热腔中点间距为 30 cm。同时升高温度至 300 ℃，连接好数据传输线，打开上位机成像显示软件；

b)调节扫描仪距离黑体分别为 20，50，80，100 和 150 cm，等待自主研发设备成像完毕并记录成像结果；

c)在距离相同情况下，使用传统红外面阵探测器成像并记录；

d)调整高温黑体发热腔距离分别为 50 和 80 cm，重复(b)，(c)步骤进行成像并记录。部分典型实测情况如图 6～11，对各种实验数据描述情况见表 3。



(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 6　两个黑体发热腔距离 30 cm，距离高温黑体 20 cm 时成像效果对比



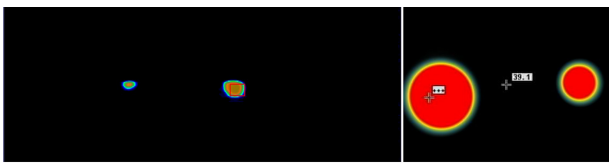
(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 7　两个黑体发热腔距离 30 cm，距离高温黑体 50 cm 时成像效果对比



(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 8　两个黑体发热腔距离 30 cm，距离高温黑体 100 cm 时成像效果对比



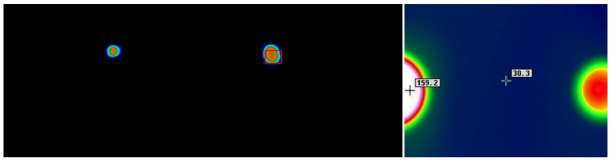
(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 9　两个黑体发热腔距离 50 cm，距离高温黑体 100 cm 时成像效果对比



(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 10　两个黑体发热腔距离 80 cm，距离高温黑体 20 cm 时成像效果对比



(a)　点元探测器扫描成像情况　　(b)　传统红外面阵探测器成像情况

图 11　两个黑体发热腔距离 80 cm，距离高温黑体 100 cm 时成像效果对比

表 3　点元探测器扫描成像与传统红外面阵探测器成像实验数据对照表

黑体发热腔间距/cm	成像距离/cm	传统红外面阵探测器成像情况		点元探测器扫描成像情况	
		描述	成像覆盖面积/cm^2	描述	成像覆盖面积/cm^2
30	20	残缺成像，仅成像半个发热腔	24	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间适中	1 600
30	50	残缺成像，仅成像 1 个发热腔	150	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间较大	10 000
30	100	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间适中	600	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间很大	40 000
50	100	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间适中	600	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间很大	40 000
80	20	残缺成像，仅成像半个发热腔	24	残缺成像，仅成像 1 个发热腔	1 600
80	100	残缺成像，两个高温黑体发热腔都只成像一半区域	600	正常成像，成像两个发热腔，剩余空间很大	40 000

由表 3 知，传统红外面阵探测器成像区域距离系数为 0.2，点元探测器扫描成像区域距离系数都为 2，点元探测器距离系数是传统红外面阵探测器距离系数的 10 倍。相同成像距离，元探测器扫描成像视野是传统红外面阵探测器成像视野的 66.67 倍，故点元探测器扫描成像视野面积明显优于传统红外面阵探测器成像视野面积。

非均匀性是影响传统红外面阵探测器成像的主要因素，目前普遍采用自适应校正算法提高精度，但对于大平面阵探测器、长线阵探测器的高分辨率成像系统，校正算法很难满足需求。本文提出的基于点元探测器扫描成像的方法，在很大程度上规避了

非均匀性。本实验通过计算方差和残余非均匀性做为评价指标。

方差计算公式如下：

$$S^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_i-T_{ic})^2}{n} \tag{8}$$

式中，T_i 表示第 i 个采样点在红外热图像上的温度，T_{ic} 表示第 i 个采样点真实温度。在黑体中线上均匀采样，计算采样点真实温度和热图像显示温度的方差，实验数据如表 4。点元探测器扫描成像系统的方差为 3.9；传统红外面阵探测器成像系统的方差为 115.6。

表 4 热图像显示温度与真实温度对比表

采样点真实温度/℃	传统红外面阵探测器成像测量温度/℃	点元探测器扫描成像系统测量温度/℃	传统红外面阵探测器成像与真实值误差/℃	点元探测器扫描成像系统与真实值误差/℃
295	306	292	11	3
297	285	296	12	1
300	294	301	6	1
300	304	300	4	0
302	307	304	5	2
301	304	300	3	1
300	311	301	11	1
300	316	298	16	2
300	286	303	14	3
298	292	300	6	2

残余非均匀性计算公式如下：

$$NU=\frac{1}{V_{oavg}}\sqrt{\frac{1}{M\times N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}(V_{ij}-V_{oavg})^2} \tag{9}$$

其中，

$$V_{oavg}=\frac{1}{M\times N-(d+h)}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}V_{ij} \tag{10}$$

式中，NU 为焦平面阵列的非均匀性，V_{ij} 为焦平面上第 i 行第 j 列所对应像元的输出信号，V_{oavg} 为焦平面上所有有效像元的视频信号平均值，M 和 N 分别为焦平面阵列的行数和列数，d 为焦平面阵列中的死像元数，h 为焦平面阵列中的过热像元数。对同一个高温黑体发热腔进行灰度成像，并计算残余非均匀性。传统红外面阵探测器成像系统残余非均匀性为 17.6%，红外点元探测器扫描成像系统残余非均匀性为 6.3%。通过数据分析可看出点元探测器扫描成像系统的均匀性明显优于传统红外面阵探测器成像系统。

4 结论

目前，传统红外面阵探测器成像因探测单元之间非均匀性、视场有限的影响而发展缓慢。本文提出的红外点元探测器扫描成像方法，打破固有红外焦平面成像思想，充分利用点元红外探测器多次多点测温成像。通过实验数据分析，红外点元探测器扫描成像视野是传统红外面阵探测器成像视野的 66.67 倍，点元探测器扫描成像系统的方差为 3.9，残余非均匀性仅为 6.3%。且点元探测器加工制造工艺简单，成本低廉，更加有利于红外成像技术的推广和应用。

参考文献：

[1] 刘 炜，牛誉霏，肖龙龙，等. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展[J]. 红外，2021，42(11)：15-24.
Liu Wei，Niu Yufei，Xiao Longlong，et al. Development of infrared focal plane array and spaceborne infrared imaging system[J]. Infrared，2021，42 (11)：15-24.

[2] 代少升，李松葵. 基于视觉特性的回转窑表面红外热图像增强方法[J]. 半导体光电，2021，42(1)：82-86.
Dai Shaosheng，Li Songkui. Infrared thermal image enhancement method of rotary kiln surface based on visual characteristics[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42 (1)：82-86.

[3] 丁立伟，邹 甲，刘 杰. 回转窑胴体红外扫描系统的设计[J]. 轻金属，2011(S1)：282-284.
Ding Liwei，Zou Jia，Liu Jie. Design of infrared scanning system for rotary kiln carcass[J]. Light Metals，2011(S1)：282-284.

[4] 程亚军，舒 倩. 基于回转窑表面的红外双波段测温方法研究[J]. 红外，2018，39(4)：43-48.
Cheng Yajun，Shu Qian. Research on infrared dual band temperature measurement method based on rotary kiln surface [J]. Infrared，2018，39(4)：43-48.

[5] 唐华明，许博文，王 斐. 基于红外热成像技术的在线扫描测温系统设计[J]. 红外，2015，36(1)：12-15，29.
Tang Huaming，Xu Bowen，Wang Fei. Design of on-line scanning temperature measurement system based on infrared thermal imaging technology[J]. Infrared，2015，36(1)：12-15，29.

[6] 许敏达，田 雪，姚 睿，等. 带摆镜的二维扫描制冷红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程，2022，51(3)：291-296.
Xu Minda，Tian Xue，Yao Rui，et al. Design of two-dimensional scanning refrigeration infrared optical system with pendulum mirror[J]. Infrared and Laser Engineering，2022，51 (3)：291-296.

[7] 谭逢富，黄志刚，张巳龙，等. 基于逐点扫描的探测器阵列靶标定系统[J]. 红外与激光工程，2020，49(2)：241-247.
Tan Fengfu，Huang Zhigang，Zhang Silong，et al. Detector array target calibration system based on point by point scanning [J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(2)：241-247.

[8] 胡海兵，杨建德，张结文. 基于 DSP 的光学望远镜二维扫描控制系统设计[J]. 电子测量技术，2018，41(12)：12-16.
Hu Haibing，Yang Jiande，Zhang Jiewen. Design of two-dimensional scanning control system of optical telescope based on DSP[J]. Electronic Measurement Technology，2018，41(12)：12-16.

[9] 周　翔，肖金球，莫洪斌，等. 自旋转式红外扫描的高压电塔状态巡检系统的研制[J]. 现代电子技术，2018，41(14)：101-105，109.
Zhou Xiang，Xiao Jinqiu，Mo Hongbin，et al. Development of high voltage tower state inspection system based on spin infrared scanning[J]. Modern Electronic Technology，2018，41(14)：101-105，109.

[10] 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.
Chen Guifang，Shen Jiao. Research on 3D thermal image generation method of rotary kiln shell surface[J]. Infrared，2015，36(7)：16-20.

[11] 张绡绡. 基于视觉仿生的红外图像增强算法研究[D]. 重庆：重庆邮电大学，2018.
Zhang Xiaoxiao. A piece of gauze research on infrared image enhancement algorithm based on visual bionics[D]. Chongqing：Chongqing University of Posts and Telecommunications，2018.

[12] 代少升，申　娇，陈桂芳，等. 基于多阈值分割的红外图像伪彩增强算法[J]. 半导体光电，2015，36(5)：800-803.
Dai Shaosheng，Shen Jiao，Chen Guifang，et al. Infrared image pseudo color enhancement algorithm based on multi threshold segmentation[J]. Semiconductor Optoelectronics，2015，36(5)：800-803.

作者简介：

代少升(1974—)，男，河南省潢川县人，博士，教授，主要从事红外成像技术系统及 SOPC 嵌入式系统设计与开发；

吴　帅(1996—)，男，湖北省襄阳市人，硕士研究生，主要研究方向为红外测温成像技术应用及嵌入式系统设计开发；

贺自强(1996—)，男，湖南省娄底市人，博士研究生，主要研究单像素成像理论及应用。