

## 电阻阵列非均匀性测试与校正

杨春伟, 廖守亿, 苏德伦, 张金生, 王仕成

(第二炮兵工程大学精确制导与仿真实验室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 电阻阵列红外图像投射器的研究在近 20 年间取得了突破性的进展。作为红外图像生成系统的关键部件, 电阻阵列的非均匀性是影响红外图像质量的主要因素, 电阻阵列在使用之前必须进行非均匀性校正才能满足红外图像生成系统的应用要求。给出了非均匀性校正的流程; 针对稀疏网格法和全屏测试法的互补性, 提出了改进的全屏测试法; 采用 3 次样条插值和分段线性法进行数据处理; 采用“在线查表法”进行实时非均匀性校正。仿真结果表明, 改进的全屏测试法及非均匀性实时算法取得了良好的效果。

**关键词:** 电阻阵列; 非均匀性校正; 稀疏网格法; 全屏测试法

**中图分类号:** TN911.73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2013)06-0345-05

## Resistor Array Nonuniformity Measurement and Correction

YANG Chun-wei, LIAO Shou-yi, SU De-lun, ZHANG Jin-sheng, WANG Shi-cheng

(Accuracy guidance and control laboratory of the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The research on resistor array based on infrared (IR) projectors has been greatly improved during the recent 20 years. As the key device of the infrared scene generation system, the resistor array's nonuniformity is the main impact factor on the performance of the infrared image, and it must be corrected before used in order to satisfy the need of the infrared scene generation system. The nonuniformity correction flow is investigated in detail; the improved flood measurement is proposed to complement sparse grid and flood approach; the data-processing based on cubic spline interpolation and piecewise linearization is introduced; the real-time nonuniformity correction based on "online look-up-tables" is proposed. The simulation shows that the methods achieve excellent results.

**Key words:** resistor array, nonuniformity correction(NUC), sparse grid, flood

### 0 引言

电阻阵列红外图像投射器的研究在近 20 年间取得了突破性的进展。电阻阵列以其低功耗、大温度范围、高空间分辨率、高占空比的特点成为红外景象投射器的主要发展方向, 它通过电流加热辐射像元内的微电阻向外产生红外辐射。由于微机械加工工艺本身的波动以及材料热物性和电学性能的不稳定, 对于相同的驱动电压, 各个辐射像元发出的红外辐射会有所差异, 即电阻阵列的非均匀性 (Nonuniformity), 它表现为一种固定图像噪声 (Fixed Pattern Noise, FPN)<sup>[1]</sup>。从定量的角度描述, 电阻阵列的非均匀性定义为某一均匀输入下辐射像

元输出能量的标准差与均值之比<sup>[2]</sup>。

引起电阻阵列非均匀性的原因很多, 包括电阻阵列自身固有的非均匀性、总线压降带来的非均匀性、暗电流引起的非均匀性等<sup>[3]</sup>。通过改善材料和生产工艺, 改善电阻阵列内部结构, 改善驱动控制器的设计可以在一定程度上降低外部因素对电阻阵列非均匀性的影响, 但对辐射像元在结构和材料辐射上的差异这一引起电阻阵列非均匀性的主因的改善并不明显。

为了生成高逼真度的红外图像, 电阻阵列在使用之前要进行非均匀性校正 (Nonuniformity Correction, NUC)。目前有效的算法是基于电阻阵列的非均匀性先验信息, 从输入数据着手研究相应的

收稿日期: 2011-01-10; 修订日期: 2013-05-06.

作者简介: 杨春伟 (1986-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为控制系统仿真与系统分析。E-mail: yangchunwei081129@163.com.

基金项目: 航空科学基金项目, 编号: 20080112005.

补偿校正算法, 对电阻阵列的驱动电压数据进行实时处理<sup>[4]</sup>。

### 1 非均匀性校正算法

非均匀性校正包括3个环节: 非均匀性测试环节、数据处理环节和实时校正环节。

非均匀性测试环节和数据处理环节是“离线”完成的, 非均匀性校正环节主要完成 MOS 电阻阵列所有辐射像元输入输出的测试, 这是最耗时的环节, 但也是整个非均匀性校正流程的基础环节, 该环节的精度决定了 MOS 电阻阵列非均匀性校正效果的优劣。

数据处理环节主要是对测试数据进行处理, 得到所有辐射像元的响应特性, 并生成查找表(Look-Up-Table, LUT)存储在计算机中。

实时校正环节“在线”运行于红外图像实时生成系统中, 根据图形生成计算机生成的图像数据调用 LUT, 完成图像数据的实时校正, 进而对电阻阵列的驱动电压进行补偿, 实时驱动电阻阵列产生红外图像。

#### 1.1 电阻阵列非均匀性测试

电阻阵列的非均匀性校正正是建立在对电阻阵列每个辐射像元的辐射特性进行精确测量的基础上的, 图1为测试原理图<sup>[5]</sup>。

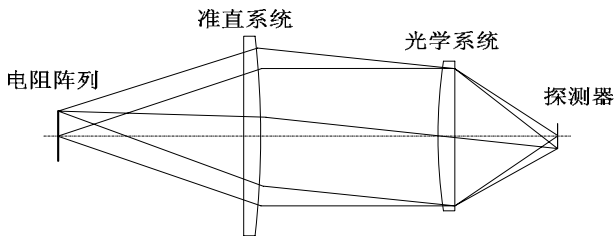


图1 电阻阵列非均匀性测试原理

Fig.1 Resistor array nonuniformity measurement principle

在进行测量之前, 保证探测器的焦平面要比投射平面大且是均匀的, 即焦平面经过了非均匀性校正<sup>[6]</sup>。

红外图像生成计算机产生图像数据驱动电阻阵列产生红外辐射, 红外辐射经过准直光学系统后投射到探测器焦平面上, 从而完成红外辐射能量在电阻阵列和探测器的传递。探测器通过光电转换输出电信号, 通过测量电信号得出辐射能量。

目前主要有2种非均匀性测试方法: 稀疏网格法和全屏测试法。

##### 1.1.1 稀疏网格法测试原理

为了测试每个辐射像元的响应特性, 避免辐射像元之间能量扩散的影响, 对电阻阵列的投射图像做网格处理, 网格划分的大小以相邻成像点之间的

能量扩散不产生重叠为准。每个网格包含  $N \times N$  个辐射像元, 每次只驱动每个网格相同位置的一个辐射像元, 投射图像为点阵图像。对于  $N \times N$  的网格大小, 一个测试点位需要进行  $N \times N$  次测试才可以完成所有辐射像元响应特性的测试。当一个测试点测试完毕后, 更改驱动电压, 进行下一个测试点的非均匀性测试。网格划分示意图及点阵投射图像如图2所示。

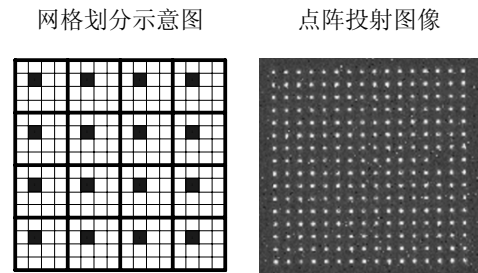


图2 稀疏网格图像

Fig.2 Sparse grid images

##### 1.1.2 全屏测试法原理

从非均匀性测试的本质来看, 电阻阵列非均匀性测试的目的在于提取出非均匀性信息, 而图像退化“平滑”了非均匀性信息<sup>[7]</sup>, 因此, 全屏测试法的主要工作在于从“平滑”的图像信息中提取出真实的图像信息。

图3所示为电阻阵列全屏测试法测试模型。该模型的工作流程如下: 图像生成计算机产生灰度图像  $S_{in}$  驱动电阻阵列产生红外辐射投射图像  $p$ ,  $S_{np}$  表征电阻阵列的非均匀性噪声, 为乘性噪声; 投射图像  $p$  经过光学系统后由于散焦等原因引起了图像退化, 此处用点扩散函数  $h$  表征<sup>[8]</sup>, 而后经过探测器输出探测图像  $u$ ; 经过图像数据处理环节, 从  $u$  中提取出非均匀性信息  $S_{nuc}$ , 这是整个流程中的关键部分, 该部分要剔除  $h$  等的影响从而还原真实的投射图像信息; 非均匀性信息在非均匀性信息生成器中累乘并反馈到灰度图像输入端, 抵消图像固定噪声的影响。该反馈控制过程经过多次迭代, 当  $S_{nuc} \rightarrow S_{np}$  时, 迭代过程结束, 此时, 非均匀性信息生成器中的累乘数据即为电阻阵列的非均匀性信息。

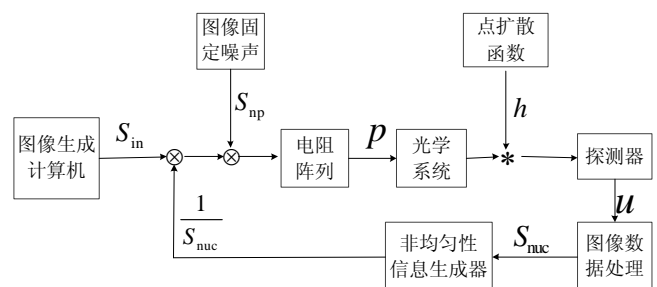


图3 电阻阵列全屏测试法测试模型

Fig.3 Resistor array flood measurement model

### 1.1.3 改进的全屏测试法

通过前两节的分析,不难看出稀疏网格法和全屏测试法的本质区别并不在于点亮辐射像元数目的多少,而是非均匀性信息的获取方式。稀疏网格法的思想是在每个测试点采集每个网格单个辐射像元的辐射亮度,而全屏测试法的思想是一次驱动所有辐射像元,通过迭代过程提取出非均匀性信息反馈到输入端补偿输入图像数据。

二者虽然都可以进行 MOS 电阻阵列的非均匀性测试,但是各自有优缺点,主要体现在以下两点:

1)全屏测试法在低压驱动时有着更高的信噪比同时测试速度快,但算法比较复杂,且高压驱动下的高电流降低了其测试效果;

2)稀疏网格法算法简单且适用于高压驱动下的非均匀性测试,但是在低压驱动下的低信噪比限制了其进一步的应用。

既然稀疏网格法和全屏测试法有着各自的优缺点且有一定互补性,不妨将 2 种测试方法综合考虑,发挥二者的优点,扩大应用范围。为此,采用稀疏网格法的点亮方式以及全屏测试法的非均匀性信息处理方法,对全屏测试法进行了改进。

改进的全屏测试法与前述测量方法的不同点在于每次点亮的不是全部的辐射像元,而是间隔一个辐射像元进行点亮,构成一幅网格图像,然后将点亮部分作为一个整体进行处理。如图 4 所示为改进的全屏测试法的点亮示意图。

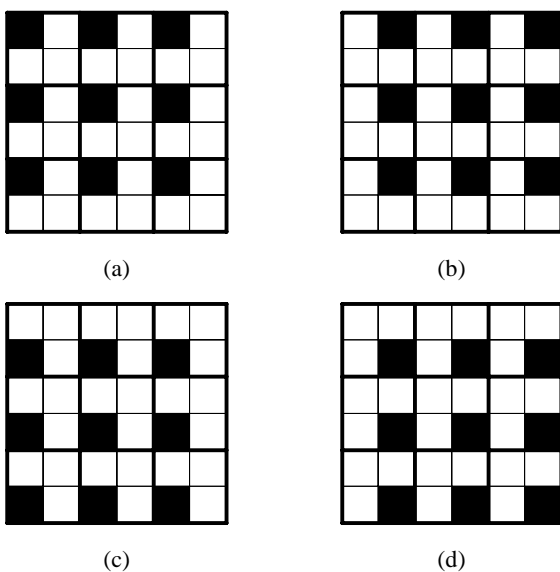


图 4 改进的全屏测试法

Fig.4 Improved flood measurement

该算法采用稀疏网格法的点亮方法,采用全屏测试法的非均匀性信息处理方法,在每个测试点进

行 4 次测试便可完成非均匀性信息的采集与处理。

## 1.2 数据处理

对通过非均匀性测试得到的电阻阵列的非均匀性信息进行处理,通过 3 次样条插值和分段线性化得到线性化查找表和校正查找表<sup>[9]</sup>,从而进行实时非均匀性校正。

### 1.2.1 线性化查找表

电阻阵列辐射像元的响应特性具有很强的非线性,通过线性化环节,所有辐射像元的响应特性为近似于直线的一簇曲线,便于对其进行校正。图 5 所示为线性化曲线。

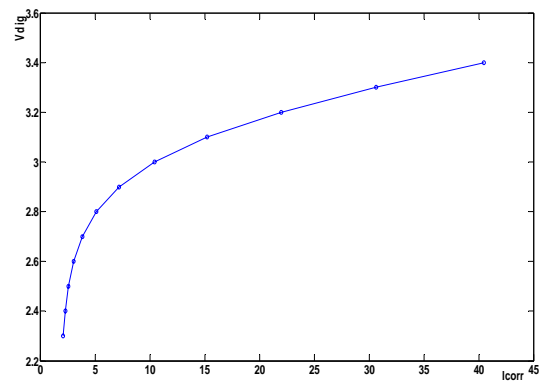


图 5 线性化曲线

Fig.5 The linearization curve

电阻阵列的线性化是通过对某一片像元区域或所有像元的平均响应特性的取反来实现的。线性化查找表的计算步骤如下:

1)对某一片像元区域的测试数据 $(v_i, l_i), i=1, \dots, m$ ,通过三次样条非线性拟合得到响应特性的反函数曲线 $I^{corr} \rightarrow V_{dig}$ 。

2)在 $I^{corr}$ 上选取 $n$ 个断点,计算分段线性插值查找表。对断点采样数据 $(I_s^k, V_s^k), (I_s^{k+1}, V_s^{k+1})$ 区间,由:

$$\begin{cases} V_s^k = G_{linear}^k I_s^k + O_k \\ V_s^{k+1} = G_{linear}^{k+1} I_s^{k+1} + O_k \end{cases} \quad (3)$$

可得:

$$G_{linear}^k = \frac{V_s^{k+1} - V_s^k}{I_s^{k+1} - I_s^k} \quad (4)$$

$$O_{linear}^k = \frac{V_s^k \cdot I_s^{k+1} - V_s^{k+1} \cdot I_s^k}{I_s^{k+1} - I_s^k} \quad (5)$$

式(4)、(5)中的 $(G_{linear}^k, O_{linear}^k), k=1, \dots, n-1$ ,是线性化查找表的 $(n-1)$ 条直线的增益和偏置参数,根据断点的数量可得线性化查找表的数据量为 $2 \times (n-1)$ 个。

### 1.2.2 校正查找表

校正查找表的功能为：对于任意的辐射像元，根据给定的输入数据  $l_{i,f}^{in}$ ，在线性化后的辐射像元响应特性曲线  $l^{corr} \rightarrow l^{out}$  的  $l^{corr}$  轴上寻找对应的  $l_{i,f}^{corr}$ 。图6为原响应特性曲线和线性化后的响应特性曲线。

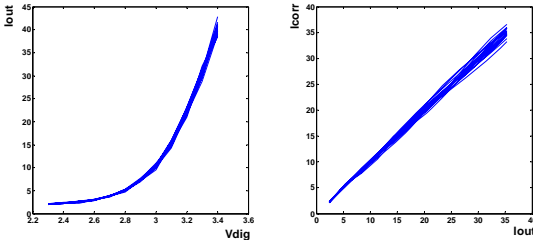


图6 线性化效果

Fig.6 The result of linearization

校正查找表的计算步骤如下：

- 1) 获得所有辐射像元的响应特性曲线  $V_{dig} \rightarrow l_{out}$ 。
- 2) 输入数据  $l_{in}$  经过线性化处理驱动电阻阵列，测量输出亮度得到测试数据  $(l_{i,f}^{corr,k}, l_{i,f}^{out,k})$ 。
- 3) 通过三次样条非线性拟合得到响应特性曲线  $l^{out} \rightarrow l^{corr}$ ，在  $l^{out}$  上等间隔选取  $n$  个断点，计算分段线性插值查找表（方法同线性化查找表的计算方法），得校正查找表增益和偏置参数为：

$$G_{i,j}^{nuc,k} = \frac{l_{i,j}^{corr,k+1} - l_{i,j}^{corr,k}}{l_{i,j}^{in,k+1} - l_{i,j}^{in,k}} \quad (6)$$

$$O_{i,j}^{nuc,k} = \frac{l_{i,j}^{corr,k} \cdot l_{i,j}^{in,k+1} - l_{i,j}^{corr,k+1} \cdot l_{i,j}^{in,k}}{l_{i,j}^{in,k+1} - l_{i,j}^{in,k}} \quad (7)$$

式(6)、(7)中的  $(G_{i,f}^{nuc,k}, O_{i,f}^{nuc,k})$ ,  $k=1, \dots, n-1$ ，为  $Pixel_{i,f}$  的校正查找表的增益和偏置参数，对于  $n \times n$  电阻阵列，校正查找表数据量为  $n \times n \times 2 \times (n-1)$ 。

### 1.3 实时校正环节

在红外成像半实物仿真系统中，输入数据为计算机输出的红外图像像素数据  $l_{i,f}^{in}$ ，输出为探测器采集的电阻阵列的红外图像像素数据  $l_{i,f}^{out}$ ，非均匀性校正的目标是在计算机输入一帧均匀的图像数据后在探测器上能够采集到同样均匀的输出图像，即：

$$l_{i,f}^{in} = l_{i,f}^{out} \quad (8)$$

对于任意的辐射像元  $Pixel_{i,f}$ ，要满足式(8)，必须首先获得所有辐射像元的辐射特性，作为非均匀性校正的先验数据。在获得了所有辐射像元的非均匀性测试数据并进行相关数据处理的基础上，便可

进行实时非均匀性校正。图7为实时非均匀性校正的流程图。

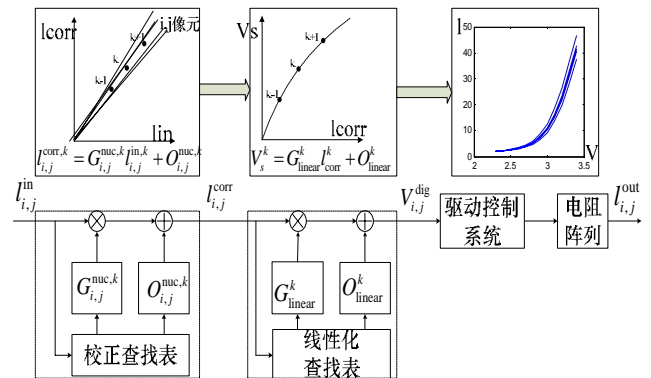


图7 非均匀性校正流程图

Fig.7 The flow of NUC

实时非均匀性校正的步骤如下：

- 1) 对于输入数据  $l_{i,f}^{in}$ ，在校正查找表中查找响应的增益值和偏置值，计算得到  $l_{i,f}^{corr}$ ；
- 2) 经过查找线性化查找表， $l_{i,f}^{corr}$  转化为驱动电压值，继而驱动电阻阵列产生红外辐射  $l_{i,f}^{out}$ 。

## 2 数值仿真实验

### 2.1 非均匀性测试

为了验证改进的算法的收敛性，在 MATLAB 下对  $16 \times 16$  数值 MOS 电阻阵列进行仿真，原始非均匀性设为 20%，PSF 的平滑因子  $\sigma$  分别设为 0.50、0.60、0.70、0.80、0.90。

表1、图8、图9所示为全屏测试法与改进的全屏测试法经过10次迭代后的残余非均匀性比较。

不难看出，随着平滑因子  $\sigma$  的不断增大，全屏测试法的算法收敛性急剧降低，当  $\sigma=0.70$  时，残余非均匀性已经超过 5%，而该改进算法即使在  $\sigma=0.90$  时的残余非均匀性已优于 1% ( $7.50 \times 10^{-5}$ )，收敛性与原算法相比有了很大的提高。

改进的全屏测试法有如下优点：

- 1) 提高算法收敛性：全屏测试法中的探测像元之间能量叠加使迭代的收敛性降低，而改进的全屏测试法每隔一个辐射像元点亮，使探测器采集到的辐射能量之间的叠加部分减少，从而加快了非均匀性信息提取的过程，提高了算法的收敛性。
- 2) 应用范围扩大：改进的全屏测试法提高了信噪比，因而能够应用于稀疏网格法无法进行精确测量的低压驱动情形；同时降低了高压驱动时流经整个电阻阵列的电流，因而也可以应用于全屏测试法应用受限制的高压驱动条件下。

表 1 残余非均匀性比较 Table 1 Comparison of residual nonuniformity

	$\sigma=0.50$	$\sigma=0.60$	$\sigma=0.70$	$\sigma=0.80$	$\sigma=0.90$
全屏测试法	0.093%	1.57%	5.96%	8.48%	12.29%
改进的全屏测试法	$9.06 \times 10^{-17}$	$7.40 \times 10^{-16}$	$4.11 \times 10^{-10}$	$5.88 \times 10^{-7}$	$7.50 \times 10^{-5}$

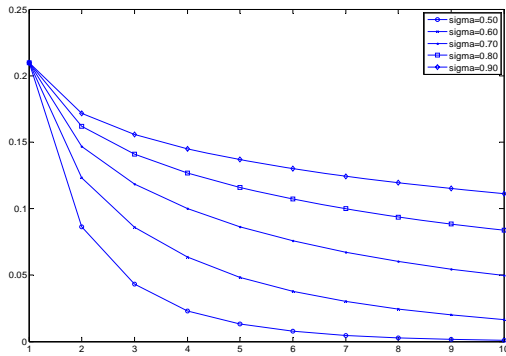


图 8 全屏测试法的收敛性  
Fig. 8 Flood convergence

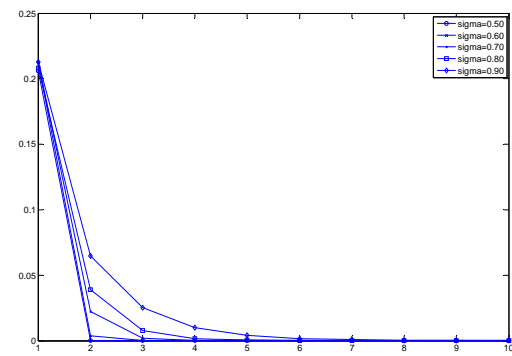


图 9 改进算法的收敛性  
Fig. 9 Improved flood convergence

## 2.2 非均匀性校正

为验证非均匀性校正算法的正确性,在 MATLAB 下生成  $256 \times 256$  数值电阻阵列进行仿真验证。以实际电阻阵列中心  $4 \times 4$  像元的实测数据作为数值电阻阵列的平均响应特性;在平均响应特性曲线采样点的输出亮度图像数据上添加高斯噪声,模拟电阻阵列的非均匀性。

数值电阻阵列的工作范围为  $2.3 \sim 3.4 \text{ V}$ ,在输入范围内选取 12 个点测试平均响应特性,采用样条插值在曲线上选取 32 个点作为分段线性插值线性化的断点采样数据。在校正数据的测试中,在线性化后的辐射像元工作范围内选取 16 个测试点,使用样条插值基于 16 组测试数据选取 32 个断点采样计算分段线性修正数据。

当辐射亮度数据为  $19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  时,校正算法的效果如图 10 所示。未校正图像的非均匀性为 2.70%,校正后的残余非均匀性为 0.068%。

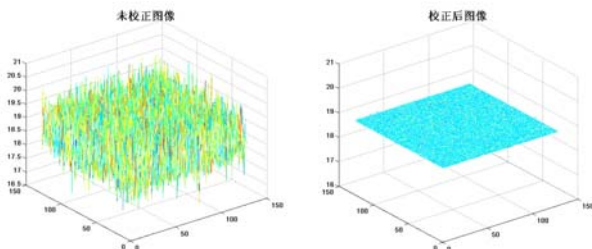


图 10 非均匀性校正效果  
Fig.10 The result of NUC

## 3 结论

通过对非均匀性校正算法的分析可知,电阻阵列的非均匀性测试精度是影响校正效果的主要因素,改进的全屏测试法综合了稀疏网格法和全屏测

试法的优点,既提高了测试效率,同时又扩大了测试范围;采用“在线查表法”进行非均匀性校正可以避免数据处理带来的复杂性,提高系统的实时性。

### 参考文献:

- [1] 肖云鹏, 马斌, 梁平治. 国产电阻阵列动态红外景像投射器研制进展[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 266-270.
- [2] 苏德伦, 王仕成, 张金生, 等. 电阻阵列稀疏网格非均匀性修正[J]. 红外与激光工程. 2009, 38(4): 604-608.
- [3] Robert A Joyce, Leszek Świerkowski, Owen M Williams. Resistor array infrared projector nonuniformity correction search for performance improvement[C]//*Proceeding of SPIE*, 2006, 6208: 62081A-1-62081A-11.
- [4] Hepp A, Heil H, Weise W, et al. Light-emitting field-effect transistor based on a tetracene thin Film[J]. *Phys. Rev. Lett.* 2003, 91: 157406.
- [5] 苏德伦, 张金生, 廖守亿. 电阻阵列非均匀性测试[J]. 红外技术, 2010, 32(6): 345-352.
- [6] Alexander G Hayes, Fino J Caraco, David C Harrison, et al. Characterization and comparison of  $128 \times 128$  element nuclear optical dynamic display system resistive array[C]//*Proceedings of SPIE*, 2006, 6208: 62080X-1-18.
- [7] Świerkowski L, Williams O M. Search for optimal infrared projector nonuniformity correction procedures II[C]//*Proceedings of SPIE*, 2000, 4207: 214-225.
- [8] Williams O M. Search for optimal infrared projector nonuniformity correction procedures[C]// *Proceedings of SPIE*, 1999, 3697: 352-365.
- [9] Alan P Pritchard, Stephen P Lake, Mark A Venables, et al. Characterization of BAe  $512 \times 512$  resistor array IR scene projection devices[C]//*Proceedings of SPIE*, 1999, 3697: 232-240.