

# 一种 CCD 器件响应度非均匀性校准装置研制

刘红元<sup>1</sup> 王恒飞<sup>1</sup> 马书民<sup>2</sup> 应承平<sup>1</sup> 吴 斌<sup>1,3</sup> 王洪超<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555  
<sup>2</sup> 青岛经济技术开发区致远中学, 山东 青岛 266555  
<sup>3</sup> 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

**摘要** 介绍了一种可见光 CCD 器件响应度非均匀性校准方法,并对校准装置进行了测量不确定度评定。得到可见光 CCD 器件响应度非均匀性扩展不确定度为 0.46%,辐射可调均匀光源的输出口直径可达 200 mm,并选用 CCD 器件对测量装置的测量不确定度进行了验证,通过验证可知测量 CCD 器件的重复性为 0.003%和 0.005%,远小于测量装置的合成测量不确定度 0.23%,说明校准装置的测量不确定度是合理的。

**关键词** 光学器件; CCD; 非均匀性; 均匀光辐射法; 测量不确定度

中图分类号 TN29; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s116003

## A Calibration Equipment of Responsivity Non-Uniformity for Charge Coupled Devices

Liu Hongyuan<sup>1</sup> Wang Hengfei<sup>1</sup> Ma Shumin<sup>2</sup> Ying Chengping<sup>1</sup>  
Wu Bin<sup>1,3</sup> Wang Hongchao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China  
<sup>2</sup> Zhiyuan Senior Middle School of Qingdao Economic and Technological Development Zone, Qingdao, Shandong 266555, China  
<sup>3</sup> Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China

**Abstract** A method of calibrating responsivity nonuniformity for visible charge coupled devices (CCD) is presented, and the measurement uncertainty for the calibration equipment is evaluated. The expanded uncertainty of responsivity non-uniformity for visible CCD is 0.46%, and the output diameter of the radiation adjustable uniform light source is 200 mm. The measurement uncertainty of the calibration equipment is verified use CCD, the measurement repeatability of the CCD is 0.003% and 0.005% less than 0.23% of the total uncertainty. The measurement repeatability of calibration equipment is reasonable. The calibration equipment can meet the calibration demand for big area array image device, meanwhile can provides a very useful reference for big area array image device factory and customers.

**Key words** optical devices; CCD; non-uniformity; uniform radiation; measurement uncertainty

**OCIS codes** 220.4830; 220.4840; 230.0040; 120.3150

## 1 引 言

电荷耦合器件(CCD)是一种技术成熟、应用广泛的图像传感器,已成为高端数字摄像的主流器件。在 CCD 成像系统中,当 CCD 被一个完全均匀的光场照射时,理论上每个 CCD 光敏单元的输出应该是

完全相同的,但事实上它们的输出会有差异。响应度非均匀性表征 CCD 器件各像素在均匀辐照度下相互之间输出信号的不一致性,在成像图上呈现为一个固定的图案,因此又称为固定噪声图案。它严重影响着 CCD 器件的成品率和成像质量,是 CCD

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家重点基金(9140A17020712DZ5101)、“十二五”计量技术基础科研项目(J312012A003)

作者简介: 刘红元(1979—),男,工程师,主要从事光电探测及探测器参数校准技术等方面的研究。

E-mail: liureduyan0917@163.com

器件的非常重要的参数。在成像探测要求较高的航空航天、深空探索、军事侦察、军事制导等领域,非均匀性是必测的参数之一<sup>[1-4]</sup>。如果采用未经过校准的 CCD 直接捕获一个灰度均匀的目标时,可能会输出强度不均匀的目标图像,这将对目标识别及其后续图像处理中的目标特征提取与测量不利,特别是在高精度测量系统中响应非均匀性对成像质量有更大影响,必须进行非均匀性校准<sup>[5-7]</sup>。

目前国内还没有相关的关于可见光 CCD 器件响应非均匀性的校准,用于这些研究领域的某些 CCD 器件使用寿命已达数十年,而仪器在这期间的老化使其性能指标与出厂时厂商所提供的数据存在较大的偏差。如果没有对 CCD 器件非均匀性进行校准,必然引入较大的偏差,因此需要对 CCD 器件非均匀性进行校准<sup>[8-10]</sup>。国外已经对可见光 CCD 器件响应非均匀性有大量的研究,特别像美国的 Labsphere 公司。

本文提出了对可见光 CCD 器件非均匀性校准方法,并对可见光 CCD 器件响应非均匀性校准装置进行了测量不确定度评定。

## 2 CCD 器件响应度非均匀性测量装置

采用的是积分球均匀光辐射法测量 CCD 器件响应度非均匀性,校准装置一般由辐照度可调均匀性光源、三维位移台、照度计、数据处理和控制系统等部分组成。其中辐照度可调均匀光源采用是美国 LabSphere 生产的积分球,积分球光学系统主要由控制计算机、控制器、电源、辐射功率监控和积分球构成。功率监控由用来监测积分球辐射功率,高稳定电源给分布在积分球内部和外部的卤钨灯供电,其开关可通过控制器在计算机上操作实现,光阑控制用来改变光阑的大小,从而控制外部光源进入积分球内的光功率大小。通过对光阑的控制可实现对积分球光辐

射亮度  $0\sim 40000\text{ cd/m}^2$  连续调节。CCD 器件响应度非均匀性校准装置测量原理如图 1 所示。

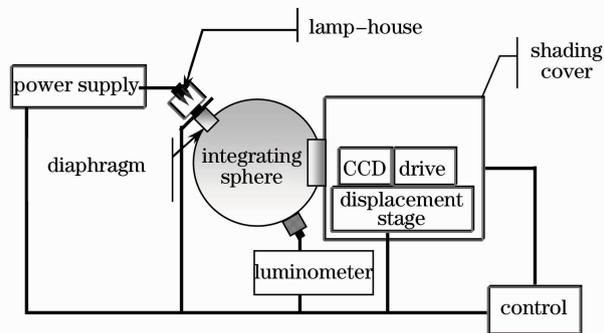


图 1 CCD 器件响应度非均匀性测量原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of responsivity of non-uniformity CCD

测量时先将 CCD 器件置于多维位移台上,调整工件台使其表面紧靠均匀性辐射源辐射面,且平行于辐射面。调节光阑,使 CCD 器件的所有有效像素的平均输出信号在  $1/2$  饱和和输出电压附近。单帧采集 CCD 器件输出信号,根据相关过热和死像素的判断标准,一般规定像素响应度小于平均响应度  $1/10$  的为死像素,像素暗输出信号大于平均暗输出信号  $10$  倍的为过热像素。剔除过热像素和死像素后,在所有有效像素中找出输出信号的最大、最小值,通过(1)式计算得到所有有效像素输出信号的平均值  $\bar{V}$ ,通过(2)式计算得到 CCD 器件响应度非均匀性。

$$\bar{V} = \frac{1}{NM - (h + d)} \cdot$$

$$\left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M V_{i,j} - \sum_{i=1}^h V_{h,i} - \sum_{i=1}^d V_{d,i} \right), \quad (1)$$

式中  $M, N$  为 CCD 器件的行、列数,  $V_{i,j}$  为第  $i$  行、 $j$  列像素的输出信号,  $V_{h,i}$  为第  $i$  个过热像素的输出信号,  $V_{d,i}$  为第  $i$  个死像素的输出信号,  $h, d$  为 CCD 器件的过热像素数和死像素数。

响应度非均匀性  $U_{\text{RMS}}$  由(2)式获得:

$$U_{\text{RMS}} = \frac{1}{\bar{V}} \times \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d + h) - 1} \left[ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{i,j} - \bar{V})^2 - \sum_{i=1}^d (V_{d,i} - \bar{V})^2 - \sum_{i=1}^h (V_{h,i} - \bar{V})^2 \right]} \times 100\%. \quad (2)$$

## 3 测量不确定度评定

由响应度非均匀性的计算公式可知,响应度非均匀性测量主要与光学系统自身的辐射非均匀性和数据采集与处理有关,在综合考虑到校准装置的各个组成部分,及校准过程中的人员、环境等各个因素

对测量结果的影响,校准装置响应度非均匀校准不确定度来源主要有积分球辐射非均匀性引入的测量不确定度、积分球辐射稳定性引入的测量不确定度、数据采集与数据处理引入的测量不确定度、空间光学系统杂散光引入的测量不确定度和被测器件放置

位置平行性引入的测量不确定度等。其中,积分球辐射非均匀性是指在积分球出口面上辐射光的非均匀性;积分球辐射稳定性是指积分球输出光的稳定性;空间光学系统杂散光是指背景光对测试的影响。因此校准装置响应度非均匀性合成标准不确定度可由(3)式计算:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2}, \quad (3)$$

式中  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$  和  $u_5$  分别是积分球辐射非均匀性、积分球辐射稳定性、数据采集和处理、空间杂散光和

表 1 积分球辐射非均匀性测量数据

Table 1 Measured data of non-uniformity integrating sphere radiation

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Non-uniformity (RMS) / %	0.21	0.20	0.22	0.23	0.25	0.20	0.19	0.24	0.22	0.23	0.22

积分球辐射非均匀性的实验标准偏差平均值为 0.22%, 自由度  $\nu_1 = n - 1 = 9$ 。因此由积分球辐射非均匀性引入的不确定度为

$$u_1 = 0.22\%. \quad (4)$$

### 3.2 积分球辐射稳定性引入的相对测量不确定度

采用波长范围为 300~1100 nm 的 Si 单点探测器对装置中的积分球辐射稳定性进行测量, 测量时

表 2 积分球辐射稳定性测量数据

Table 2 Measured data of stability integrating sphere radiation

Times	1	2	3	4	5	6	Average
Stability / %	0.008	0.007	0.009	0.008	0.010	0.006	0.008

### 3.3 信号采集与数据处理引入的测量不确定度

信号采集与数据处理对校准结果影响的大小主要由信号噪声及数据采集精度和重复性决定。利用

表 3 CCD 器件输出信号测量数据

Table 3 Measured data of CCD output signal

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Signal / V	1.59562	1.58933	1.59221	1.58989	1.59333	1.59478	1.59463	1.58946	1.59444	1.59331
Times	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Signal / V	1.58889	1.59456	1.59568	1.58998	1.59594	1.59345	1.59468	1.58987	1.59132	1.59465

20 次信号采集平均值为 1.59280 V, 相对实验标准偏差为 0.015%, 自由度  $\nu_3 = n - 1 = 19$ , 因此由信号采集与数据处理引入的测量不确定度为

$$u_3 = 0.015\%. \quad (6)$$

### 3.4 空间光学系统杂散光引入的测量不确定度

空间光学系统杂散光影响主要是空间光的非均匀性对测试结果的影响。采用波长范围为 300~1100 nm 的 Si 单点探测器对空间光学系统杂散光的非均匀性进行测试, 扫描范围 20 cm ×

器件放置位置平行性引入的测量不确定度分量。

### 3.1 积分球辐射非均匀性引入的相对测量不确定度

辐射均匀光系统采用从美国 Labsphere 公司定制的高质量积分球辐射光源, 其整个输出口均匀性优于 0.5%。利用点探测器扫描法在 20 cm × 20 cm 辐射孔范围内对装置中的积分球辐射非均匀性进行测量, 连续测量 10 次, 每次测量数据利用贝塞尔公式计算出积分球辐射非均匀性的实验标准偏差如表 1 所示, RMS 表示均方根。

间为 30 min, 采样间隔为 30 s, 连续测量 6 次, 每次测量数据利用贝塞尔公式计算出积分球辐射稳定性的实验标准偏差如表 2 所示, 自由度  $\nu_2 = n - 1 = 5$ 。

由于 CCD 器件响应度非均匀性校准在 2~3 s 内即可完成, 因此由积分球辐射稳定性引入的不确定度最大值为

$$u_2 = 0.008\%. \quad (5)$$

装置中数据采集系统对稳定的信号进行连续采集 20 次, 采集数据如表 3 所示。

20 cm, 连续测量 4 次, 测试数据如表 4 所示。

空间环境杂散光响应信号平均值为 0.00938 V, 非均匀性平均值为 0.49%, 自由度  $\nu_2 = n - 1 = 5$ , 由于 CCD 器件响应度非均匀性校准时其平均信号一般大于 1 V, 则空间光学系统杂散光引入的测量不确定最大值为

$$u_4 = \frac{0.00938}{1.00000} \times 0.49\% \approx 0.005\%. \quad (7)$$

表 4 空间光学系统杂散光非均匀性测量数据

Table 4 Measured data of non-uniformity stray light of the spatial optical system

Time	1	2	3	4	5	6
Uniformity (RMS) /%	0.48	0.50	0.49	0.51	0.48	0.49
Signal average /V	0.00918	0.00928	0.00956	0.00944	0.00929	0.00954

### 3.5 被测 CCD 器件放置平行性引入的测量不确定度

理想情况下,被 CCD 器件表面应与积分球辐射面完全平行,但实际操作中这种平行是相对的,它们之间或多或少都有一定的夹角。由于采用多项措施保证他们之间的平行性,使夹角不会超过 2°。假设夹角为 2°,20 cm 长度内其距离为  $20 \times \tan 2^\circ = 0.7$  cm,用单元探测器测试在 0.7 cm 内积分球辐射

变化最大为 0.0006 V,由于输出信号一般大于 1.0 V,则被测 CCD 器件放置位置平行性引入的测量不确定最大为

$$u_5 = 0.06\% \quad (8)$$

由以上分析可知,校准装置响应度非均匀性测量不确定度来源如表 5 所示。

表 5 测量不确定度来源

Table 5 Source of measurement uncertainty

Source of measurement uncertainty	Uncertainty components /%	Evaluation method	Degrees of freedom
Non-uniformity integrating sphere radiation	$u_1 = 0.220$	A	9
Stability Integrating sphere radiation	$u_2 = 0.008$	A	5
CCD output signal	$u_3 = 0.015$	A	19
Non-uniformity stray light of the spatial optical system	$u_4 = 0.005$	A	5
Placed parallelism of CCD	$u_5 = 0.060$	B	$\infty$

### 3.6 合成标准不确定度

由以上分析可得校准装置响应度非均匀性校准合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{0.0022^2 + 0.00008^2 + 0.00015^2 + 0.00005^2 + 0.0006^2} \approx 0.23\% \quad (9)$$

### 3.7 扩展不确定度

其有效自由度为

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^5 u_i^4 / v_i} = \frac{(0.0023)^4}{(0.0022)^4 / 9 + (0.00008)^4 / 5 + 0.00015^4 / 19 + 0.00005^4 / 5 + 0.0006^4 / \infty} \approx 11. \quad (10)$$

设置信概率为 95%,查阅  $t$  分布表可知,当有效自由度为 11 时,包含因子  $k \approx 2$ ,因此校准装置 CCD 器件响应度非均匀性的扩展不确定度为

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.23\% = 0.46\% \quad (11)$$

## 4 试验验证

在 CCD 器件响应度非均匀性测量范围内,选用两只型号分别为 23K9HC 和 04G5DHC 的 CCD 器件进行非均匀性试验。像素数分别为 768 pixel ×

576 pixel 和 2050 pixel × 2448 pixel,通过光阑孔调整积分球辐射功率大概在 CCD 器件饱和响应电压 1/2 处,通过位移平台调整 CCD 光平面距出光孔距离为 0,通过软件连续测量 6 次,每次测量数据利用贝塞尔公式计算出 CCD 器件的实验标准偏差如表 6 所示。再用贝塞尔公式计算出 6 次测量的重复性,重复性均小于 2/3 合成标准不确定度  $u_c$ ,说明不确定度分析与评定是合理的。

表 6 CCD 器件响应度非均匀性测量数据

Table 6 Measured data of non-uniformity CCD responsivity

Model	Measurement value /%						Average /%	Repetitive /%
23K9HC	2.171	2.166	2.170	2.170	2.165	2.170	2.169	0.003
04G5DHC	1.822	1.812	1.821	1.818	1.812	1.812	1.816	0.005

## 5 结 论

介绍了可见光 CCD 器件响应度非均匀性校准方法,并对校准装置进行了测量不确定度评定。得到可见光 CCD 器件响应度非均匀性扩展不确定度为 0.46%,辐射可调均匀光源的输出口直径可达 20cm,并选用 CCD 器件对测量装置的测量不确定度进行了验证,通过验证可知测量 CCD 器件的重复性为 0.003%和 0.005%,远小于测量装置的合成测量不确定度 0.23%,说明校准装置的测量不确定度是合理的。校准装置性能稳定可靠,完全可以满足目前大面阵成像器件的校准需求。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu, *et al.*. Detection and correction of response non-uniformity based on visible light area CCD[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2010, 25(5): 759-763.  
刘研研,李国宁,张瑜,等.可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J].液晶与显示,2010,25(5):759-763.
- 2 Wang Gaoming, Guo Cheng, Zhang Liangliang, *et al.*. Simulation of the light energy uniformity of integrating sphere based on Monte Carlo method[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 67-69.  
王高明,郭城,张亮亮,等.积分球光能均匀性的 Monte Carlo 模拟[J].激光与红外,2009,39(1):67-69.
- 3 Xu Xiaofeng, Wang Yi, Zhang Liming, *et al.*. Study on uniformity measurements of space integrating sphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(5): 817-820.  
徐晓峰,王冀,张黎明,等.航天积分球面均匀性检测的研究[J].量子电子学报,2005,22(5):817-820.
- 4 Tan Jiahai, Chen Yongquan, Qu Youshan, *et al.*. Scientific grade CCD camera calibration system design[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(1): 85-89.  
谭家海,陈永权,屈有山,等.科学级 CCD 相机标定系统的设计[J].光子学报,2011,40(1):85-89.
- 5 Li Baoyong, Ren Jianwei, Wan Zhi, *et al.*. Research of large aperture integrating sphere used in the radiative calibration for space remote sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(3): 464-469.  
李葆勇,任建伟,万志,等.一种空间相机辐射定标用大面积辐射光源的研制[J].光电子·激光,2013,24(3):464-469.
- 6 Xie Na, Zhou Hai, Zhang Junwei, *et al.*. Stability of optical elements in large laser facilities [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2411-2417.  
谢娜,周海,张军伟,等.大型激光装置光学元件的稳定性设计[J].光学精密工程,2009,17(10):2411-2417.
- 7 Li Ping, Xiong Limin, Wang Yu. Digital analysis of uniform source for integrating sphere radiation field [J]. Modern Measurement and Test, 2000, (6): 13-17.  
李平,熊利民,王煜.积分球辐射场均匀性的数值分析[J].现代计量测试,2000,(6):13-17.
- 8 Song Maoxin, Yang Benyong, Yuan Yinlin, *et al.*. Structure design and test of onboard calibration integrating sphere of multi-angle polarimetric radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2338-2344.  
宋茂新,杨本永,袁银麟,等.多角度偏振辐射计星上积分球结构设计及检测[J].光学精密工程,2012,20(11):2338-2344.
- 9 Lü Tao, Zhang Jingxu, Fu Donghui, *et al.*. Luminance uniformity measurement of integrating sphere using imaging method[J]. Journal of Applied Optics, 34(2): 308-312.  
吕涛,张景旭,付东辉,等.成像法测量积分球的亮度均匀性[J].应用光学,34(2):308-312.
- 10 Hao Yingwei, Li Ping, Wu Houping, *et al.*. Output irradiance uniformity of integrating sphere source [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 548-553.  
赫英威,李平,吴厚平,等.积分球辐射光源照度均匀性研究[J].应用光学,2012,33(3):548-553.

栏目编辑:何卓铭