

线阵 CCD 探测器主要性能的测试与研究

孙振亚, 刘栋斌, 张 航, 李 帅, 姜宇鹏

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:为了保证 CCD 探测器在航空航天探测方面的可靠性,文中针对 Kodak 公司的商用三线阵 CCD 探测器 KLI-2113,给出了该三线阵 CCD 探测器的主要测试性能参数及其定义,以及该三线阵 CCD 探测器的测试原理和测试方法,并且对部分核心设备指标进行了说明。最终对 20 片 KLI-2113 进行测试,得到了具有参考意义的测试结果,并对实验结果进行了对比分析。测试结果在片内和片间都有较好的一致性,该结果为三线阵探测器的航空航天等遥感观测领域的运用提供了有力的参考数据。

关键词:线阵 CCD;性能参数;测试

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)12-0226-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.12.053

Test and Research of Main Performance for Linear CCD

SUN Zhen-ya, LIU Dong-bin, ZHANG Hang, LI Shuai, JIANG Yu-peng

(Institute of Changchun Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to make sure the reliability of Charge Couple Device (CCD) in aerospace observation, in view of the linear CCD KLI-2113 from Kodak Corporation, summarize the main performance parameters and the definition of the three linear CCD, and the test theorems and the methods, and describe the core indicators in the part of equipment. Finally, carry out the test for the 20 pieces of KLI-2113, obtaining the test results with reference value and comparing them through the experiment. The test results have good consistency in internal pieces and between pieces, which provide a powerful support for the CCD application in aerospace observation.

Key words: linear CCD; performance parameters; test

0 引 言

电荷耦合器件 (CCD) 是把入射光在光敏单元激发出的光信息转换成模拟电信号的器件。该器件具有重量小、体积小、功耗低、动态范围大、准确度高、稳定性高、寿命长等优点,被广泛应用在航天遥感观测、载荷对地观测等领域^[1-3]。

Kodak 公司商业级的三线阵探测器 KLI-2113 具有高敏感度、宽动态范围、高数据率以及低噪声等优点,故适合用在空间光电探测领域。在航天任务中的探测器,对其质量等级要求很高。为保证探测器的可靠性及其主要性能参数可以达到要求,需要对探测器在地面进行温度循环和老炼实验。实验后需要对其主要性能参数进行重测。特别地,当焦平面需要的探测

器较多时,同一种探测器也需要有较高的一致性。所以对多片探测器测试后进行多片比较是非常必要的。

文中针对应用于同一焦平面的经过温度循环和老炼实验后的多片线阵探测器进行测试,并对测试结果进行说明^[4-6]。

1 CCD 测试设备和 KLI-2113 电路

1.1 CCD 测试设备

CCD 综合测量仪是对 CCD 探测器主要性能参数测试的仪器,其原理如图 1 所示^[2]。

该测量仪的核心部件面光源的光谱范围:400 ~ 2 500 nm,被测器件接收面处照度:0 ~ 316 Lx 连续可调,面光源的孔径 $\Phi 100$ mm,实际的有效孔径 $\Phi 85$

收稿日期:2014-01-10

修回日期:2014-04-15

网络出版时间:2014-10-23

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2011AA12A103)

作者简介:孙振亚(1986-),男,吉林珲春人,硕士,研究实习员,从事空间光学探测方面的研究;刘栋斌,博士,研究员,从事空间光学成像系统方面的研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141023.1047.006.html>

mm,面光源的均匀性大于 98% (在 Φ75 mm 内),色温:2 856 ~ 3 100 K,光源稳定性大于 0.2%/0.5h。

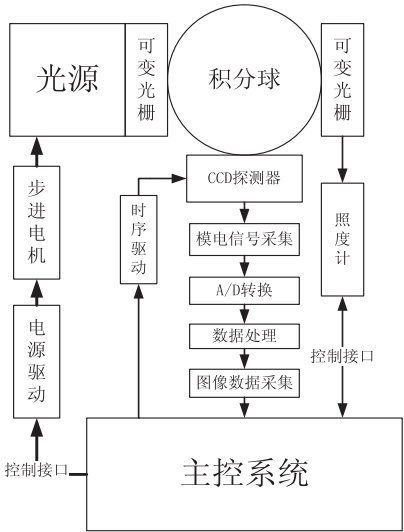


图 1 CCD 性能参数综合测量仪原理框图

由此可见,该面光源完全满足测试 KLI-2113 探测器的技术指标。

1.2 KLI-2113 电路

KLI-2113 是 Kodak 公司一个三线阵探测器,它由 3 条平行的并且完全相同的光电二极管阵列组成。该探测器的主要参数如表 1 所示^[5]。

表 1 KLI-2113 主要参数

参数	典型值
像元数	2 098×3
像元尺寸	14 μm×14 μm
动态范围/dB	76
饱和电子数	170 000
电荷转移效率	0.999 99
最大数据率/(MHz/Channel)	20
暗电流/(pA/pixel)	0.02

KLI-2113 模拟电源+12 V,低电平接地。

同时 KLI-2113 共需要 7 个时钟驱动信号,分别是输出时钟驱动信号 QR、曝光控制时钟驱动信号 LOG、转移时钟驱动信号 TG1 和 TG2 及读出时钟驱动信号 Q1、Q2 和 Q2S。KLI-2113 的工作周期分为光信号积分阶段和电荷转移阶段,一个周期完成后就有一组电荷转移出^[7-9]。

KLI-2113 的一个工作周期分为两个阶段:光积分阶段和电荷转移阶段。转移脉冲 TG1 和 TG2 处于高电平时,光敏元区积累的电荷信号并行地转移到其与每个像素对应的移位寄存器。同时,为了保证电荷信号的充分转移,TG1 高电平持续时间至少有 500 ns, TG2 高电平持续时间比 TG1 至少多 500 ns。转移脉冲处于低电平时,光敏元区与移位寄存器被隔离,该期间光敏元区处于光积分阶段,而且移位寄存器在读出脉冲的作用下,逐个地输出各个像元信号至 OS 端。本

设计中,读出时钟 Q1 和 Q2 是反向的关系,占空比为 1 : 1,时钟频率为 2 MHz;由于不需要相邻像素相累加,Q2S 和 Q2 保持相同的频率和相位关系;输出复位脉冲 QR 用于清除上一个像素转移后的残余电荷,其频率和 Q1、Q2 相同,占空比为 1 : 9。

2 测试条件和测试方法

2.1 测试条件

KLI-2113 探测器的测试条件如下:

(1) 保证有均匀照度的光源,不受外界杂光干扰。曝光量 (Q_v) 应准确已知,且精确可调。

$$Q_v = E_v \cdot t$$
 (1)

式中, t 代表电荷量的积分时间,在 KLI-2113 探测器的电子扫描电路已确定的情况下可以推出光照度 E_v 的数值。

(2) 保证测试设备的工作环境合适和恒定。

(3) 测试前需要对设备预热使其处于正常状态。

(4) 选择好积分球运行的速度,并控制打开和关闭。由于测量是从积分球完全关闭开始的,所以这里可以设置较大的速度并关闭积分球,积分球完全关闭后,再更改积分球速度(因为速度设置过快,会导致积分球输出照度值与预设的照度值偏差过大),以便进行以后的测量。

2.2 测试方法

该测试装置是对 CCD 光电性能参数进行测量时,积分球出射的均匀光斑直接照射在 CCD 靶面上,在预设定的照度值下,自动地调节输出照度,并在设定的照度条件下对 CCD 各项参数进行测量。需要测量的参数为:信号传递函数、响应度、饱和照度、噪声、阈照度、动态范围、均匀性、线性度、无效像元个数。

2.2.1 信号传递函数(STF)的测量

响应度、饱和照度、阈照度、动态范围的测量可以归结到信号传递函数(STF)的测量。

STF 是探测器输出信号值(灰度值或电压值)与探测器接收到输入照度值的函数关系式,见式(2)。由该公式可以推算出系统的响应度、饱和照度、阈照度、动态范围、线性度等重要参数。

$$STF = \frac{V_p - V_N}{E}$$
 (2)

式中, E 表示照度; V_p 表示有光照时的输出信号值; V_N 表示无光照时的输出信号值。

感光器件在光源照射下,其有效光敏元对应每单位照度值所产生的输出信号值 V_0 对应的响应度为 R ,表征了感光器件受照度 E_v 与输入信号之间光电转换的特性参数。公式如下:

$$R = V_0/E_v$$
 (3)

对于 CCD 探测器,当曝光时间 t 一定时,响应度 R 与 STF 等价。CCD 探测器的光照响应度曲线是个斜线图^[10]。

开机后待预热 10 分钟,由主控系统根据程序控制可变光栅的尺寸,从而改变入射到 KLI-2113 探测器光敏元上的照度 E_v ,同时根据已选定的电荷积分时间 t ,并测得输出信号值 V_0 ,由公式(3)测得响应度 R 。

2.2.2 饱和照度与饱和曝光量的测量

饱和照度(E_s)是指器件输出信号达到饱和时的最小入射照度,饱和曝光量(Q_s)是指器件输出信号达到饱和时的最小入射曝光量。饱和输出信号是指器件的有效光敏元接收到的曝光量大于某一限度,器件的输出不再随曝光量的增加而线性变化,此时对应的最大输出信号称为饱和输出信号(V_{os})。

在测试响应度的基础上,将可变光栅一直增大至 V_0 不再增加为止,此时的输出信号值就是 V_{os} ^[11]。

2.2.3 暗噪声和阈照度的测量

将可变光栅孔径完全关闭,保证光敏元接收不到任何光照,在此条件下,采集 M 帧图像,噪声是探测器的有效光敏其暗噪声电压 $V_{NB}(i)$ 随时间变化的均方根值,如式(4):

$$V_N = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{NB}(i) - V_{NB}(i) \right)^2} \quad (4)$$

光栅逐渐打开时,探测器的噪声为 V_N 所对应的照度是等效噪声照度(E_N)。

在与上述相同的条件下,将可变光栅孔径逐渐变大,使得光敏元上的照度逐渐增加,将 KLI-2113 探测器的输出信号值 $V_{TH} = 10V_N$ 时的照度称为阈照度(E_{TH}),计算公式如下:

$$E_{TH} = 10V_N / STF \quad (5)$$

根据式(5)即可测出阈照度^[12]。

2.2.4 动态范围的测量

KLI-2113 探测器的动态范围(D_R)定义为饱和照度(E_s)与等效噪声照度(E_N)的比值。动态范围表征 KLI-2113 探测器探测光信号大小的相对范围,由式(6)所示:

$$D_R = 20 \log(E_s / E_N) \quad (6)$$

2.2.5 响应度不均匀性的测量

KLI-2113 探测器响应度的不均匀性(U_{PRNU})的测试在各光敏元均在 3/4 饱和曝光量条件照射下,各有效光敏元各自输出信号与所有光敏元输出信号的平均值之差的均方根同所有光敏元输出信号的平均值的百分比,表达式见式(7):

$$U_{PRNU} = \frac{1}{V_A} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [V(i) - \bar{V}_A]^2} \quad (7)$$

式中, $V(i)$ 表示各有效光敏元各自输出信号; \bar{V}_A 表示所有光敏元输出信号的平均值,见式(8):

$$\bar{V}_A = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N V(i) \quad (8)$$

式中, N 为 KLI-2113 探测器的总像元个数。

响应度的不均匀性表征探测器在同一光照条件下各有效光敏元响应度的不一致性^[13]。

2.2.6 线性度的测量

线性度(K_L)表征探测器响应度偏离直线的程度,表达式见式(9):

$$K_L = \frac{V_{MAX}/E_{MAX} - V_{MIN}/E_{MIN}}{V_{MAX}/E_{MAX} + V_{MIN}/E_{MIN}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, V_{MAX} 为探测器接收最大照度; E_{MAX} 为所对应的输出信号值; V_{MIN} 为探测器接收最小照度; E_{MIN} 为所对应的输出信号值。一般取 $E_{MAX} = 0.8E_s$, $E_{MIN} = 0.1E_{MAX}$ ^[14]。

2.2.7 无效像元个数的测量

探测器中的无效像元包含死像元和“过热”像元两种。死像元(D_0)定义为像元的响应度小于平均响应度 1/10 的像元。“过热”像元(H_0)定义为像元的噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元。

在测试 KLI-2113 探测器时,无效像元个数是必须要测试的。

3 测试结果及分析

对 20 片筛选后的 KLI-2113 探测器进行了综合测试,将 20 片 CCD 的测试结果进行片间和片内的比较,KLI-2113 是三线阵的探测器,每一项一共 60 个测试结果。

图 2 为 20 片 KLI-2113 探测器的噪声测试结果。一共 60 个噪声测试数据处于 1.08 V 到 1.22 V 之间。

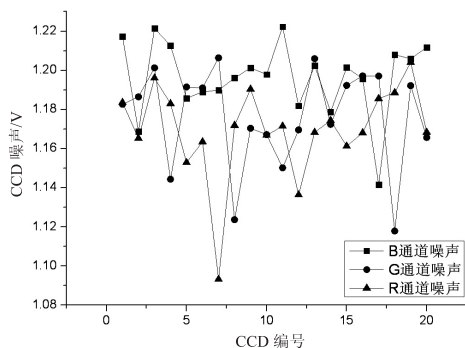


图 2 20 片 KLI-2113 探测器的噪声

图 3 为 20 片 KLI-2113 探测器的动态范围测试结果。在该设备下测试出的动态范围均处于 70 dB 到 71.6 dB 之间。

图 4 为 20 片 KLI-2113 探测器的非线性度的测试结果。出现最大非线性度值的是第 12 片的 B 通道,非

线性度值为 0.48%。

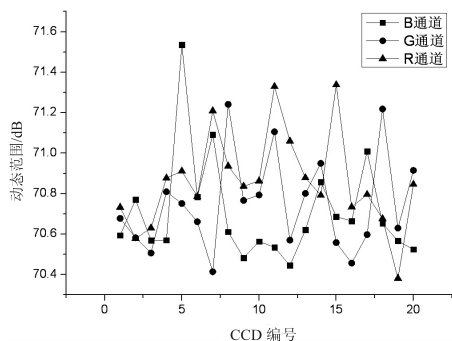


图 3 20 片 KLI-2113 探测器的动态范围

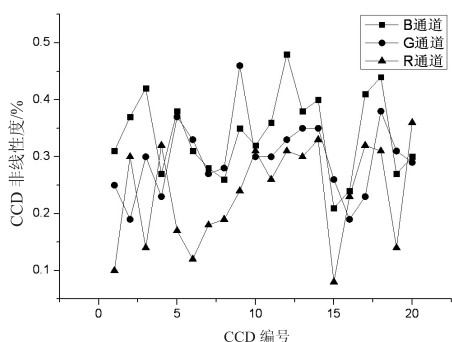


图 4 20 片 KLI-2113 探测器的非线性度

图 5 为 20 片 KLI-2113 探测器的响应不均匀性的测试结果。出现最大响应不均匀性值的是第 2 片的 R 通道,响应不均匀性值为 7.21%。

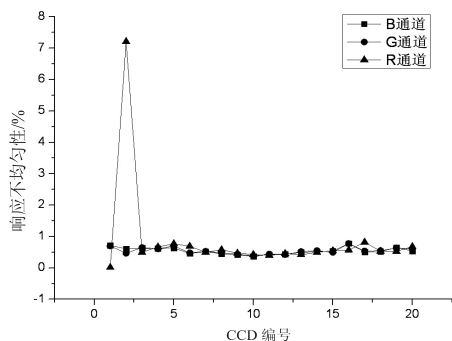


图 5 20 片 KLI-2113 探测器的响应不均匀性

在该设备下测试出 20 片 KLI-2113 探测器的阈照度均处于 0.016 lx 到 0.02 lx 之间,饱和照度均处于 5.8 lx 到 7.3 lx 之间。

图 6 为第 5 片 KLI-2113 探测器的 R 通道响应曲线图。从该图中可以看出探测器的最小响应值和最大响应值以及该值对应的光照度,拟合出的斜线也与式(2)相符。

4 结束语

从 20 片 KLI-2113 探测器的测试结果可以看出,整体的一致性较好的。在图 5 中第 2 片的 R 通道的响应不均匀值偏大是因为该通道出现了 13 个无效像元数。除了动态范围约比手册数据少了 6 个 dB,其他

数据都在可接受范围内,使用时去除第 2 片探测器。

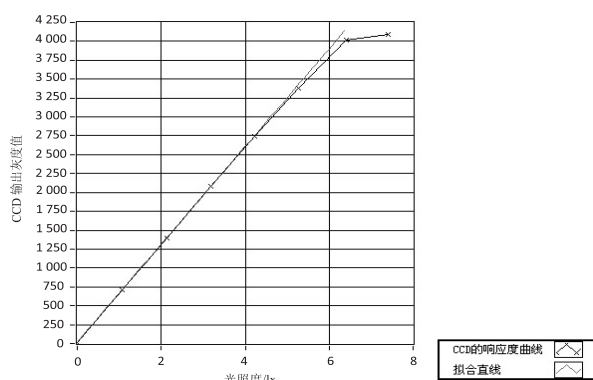


图 6 KLI-2113 探测器的响应曲线图

该测试为 20 片的 KLI-2113 探测器的筛选提供了有效的数据,为该探测器能在航空探测方面的应用提供了有力的参考数据。


参考文献:

- [1] Boyle W S, Smith G E. Charge coupled semiconductor devices [J]. Bell System Technical Journal, 1970, 49(1): 587-593.
- [2] 叶培建, 刘福安, 曹海翔. 线阵 CCD 器件主要性能参数及测试方法[J]. 中国空间科学技术, 1997, 17(3): 44-51.
- [3] 孙大维, 赵 杨. CCD 组件参数测试系统的设计[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(7): 92-93.
- [4] 孙景旭, 刘则洵, 万 志, 等. CCD 成像电子学单元光电参量测试系统[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 289-294.
- [5] 张 航, 刘栋斌. 线阵探测器 KLI-2113 总剂量辐照性能试验分析[J]. 发光学报, 2013, 34(5): 611-616.
- [6] 常丹华. 一种新的 CCD 外围电路设计方法[J]. 传感器技术, 2001, 20(6): 32-34.
- [7] 薛旭成, 李云飞, 郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1191-1195.
- [8] 李正岱, 刘文怡. 多路信号采集器的硬件电路设计[J]. 微计算机信息, 2008, 24(1-2): 220-222.
- [9] 张 达, 刘栋斌. 三线阵 CCD 视频信号处理系统研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 167-171.
- [10] 赵 亮, 刘海欧. CCD 组件参数综合测试系统应用研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 5-7.
- [11] Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibration, Part IV: real time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 566-578.
- [12] Stem A, Kopeika N S. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion using moments and its implementation in image restoration[J]. SPIE, 2004, 2827: 191-202.
- [13] Papoulis A. Probability random variables and stochastic processes[M]. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [14] Hadar O, Fisher M, Kopeika N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer function[J]. SPIE, 1991, 1482: 79-91.

线阵CCD探测器主要性能的测试与研究

作者：[孙振亚](#)，[刘栋斌](#)，[张航](#)，[李帅](#)，[姜宇鹏](#)，[SUN Zhen-ya](#)，[LIU Dong-bin](#)，[ZHANG Hang](#)，[LI Shuai](#)，[JIANG Yu-peng](#)

作者单位：[中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所](#), 吉林 长春, 130033

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(12)

引用本文格式：[孙振亚](#). [刘栋斌](#). [张航](#). [李帅](#). [姜宇鹏](#). [SUN Zhen-ya](#). [LIU Dong-bin](#). [ZHANG Hang](#). [LI Shuai](#). [JIANG Yu-peng](#) [线阵CCD探测器主要性能的测试与研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(12)