光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022111101

CCD 电荷转换因子通用测试方法研究

唐遵烈，李博乐，周建勇*，涂　戈，江宇祺，李晓力

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 通过分析电荷耦合器件(CCD)图像传感器光电转换、电荷转移、电荷输出的工作原理，提出了一种通用高效的电荷转换因子(CVF)测试方法。该方法采用在 CCD 感光区域施加直流偏压，水平区施加连续转移的驱动时序的方式，使 CCD 光敏区以电荷溢出方式往水平区转移电荷，水平区以固定频率不间断转移输出电荷包，从而让 CCD 输出强度恒定的响应信号；然后通过复位漏电流与输出信号强度的对应关系计算出 CCD 器件的 CVF 值。根据该方法的原理设计了一种适应各种 CCD 器件的通用测试装置，并对多款 CCD 进行测试验证。结果表明，该方法有效提高了 CCD 电荷转换因子的测试效率、测试精度和稳定性。

关键词： CCD；电荷转换因子；测试方法；测试装置

中图分类号： TN386.5　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0199－05

Study of A General Testing Scheme of the CCD's Charge to Voltage Factor

TANG Zunlie, LI Bole, ZHOU Jianyong, TU Ge, JIANG Yuqi, LI Xiaoli

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A general efficient charge to voltage factor (CVF) testing scheme is proposed by analysing the working principle of the photovoltaic conversion, charge transfer and charge output in CCD. In the scheme, the photosensitive zone of CCD transfered charge to the horizontal zone and the horizontal zone continuously output charge packets with a constant frequency by adding a DC bias on the photosensitive area of CCD and the continuously transfer driving sequential was added on the horizontal zone. Thus, the stable intensity response signal was output. Then, CVF was calculated by relationship between the reset leakage current and output signal intensity. According to the principle of the method, a general testing device for different CCD devices was designed to adapt to various CCDs, and a variety of CCDs were used for testing and verification. The result shows that the proposed scheme inproves the testing efficiency, accuracy and stability of the CVF.

Key words: CCD; charge to voltage factor; testing scheme; testing device

0　引言

在 CCD 的众多性能参数中，电荷转换因子或称电荷-电压转换因子(CVF)是衡量 CCD 器件性能的一项重要指标，它可以衡量 CCD 将电荷转换为电压的能力，与 CCD 量子效率、满阱电荷、动态范围等指标密切相关[1]。在航天遥感领域应用中，CCD 器件量子效率等核心指标设计尤其重要，因此准确而高效地测试一款 CCD 的 CVF 参数非常关键。此外，对于 CCD 器件的设计人员而言，CVF 的准确测试为器件设计提供了重要的参考依据[1]。

受现有测试装置、测试方法的局限，要求 CCD 必须工作在正常成像的状态下才能进行 CVF 测试评价。然而不同型号 CCD 的物理结构、工作时序都

收稿日期：2022－11－11.

* **通信作者：**周建勇　**E-mail：**18996013020@189.cn

不相同，在对不同型号 CCD 进行测试时，需单独设计驱动时序和测试电路，测试复杂度高、效率低。另外，受工作时序的影响，CCD 输出信号不能保持连续而稳定地输出，使得输出节点复位漏端的电流不稳定，导致 CVF 测试值精度低、稳定性差。

本文提出了一种通用高效的 CVF 新型测试方法，并基于此方法设计了一种适用于各种 CCD 器件的 CVF 通用测试装置，有效提高了 CCD 电荷转换因子的测试效率、测试精度和稳定性。

1 电荷转换因子测试方法现状

鉴于 CVF 参数测试的必要性，国内外的研究者提出了一系列的 CVF 测试方法。

其中最经典的方法是复位漏电流法，该方法依照电荷转换因子的定义，通过测量 CCD 的复位漏电流、输出信号幅度、积分时间和有效像元数来计算，其计算公式如下：

$$CVF = \frac{V_o}{I_{RD}T} qN \times 10^{15} \tag{1}$$

式中，V_o 为 CCD 的输出信号幅度，单位为 μV；I_{RD} 为复位漏端电流，单位为 nA；T 为 CCD 工作时的积分时间，单位为 ms；$q = 1.6 \times 10^{-19}$ C 为电子电荷；N 为 CCD 的有效像元数；CVF 的单位为 $\mu V/e^-$。该方法要求待测 CCD 器件处于正常成像的状态，由于不同种类 CCD 拥有各自的特定工作时序，因此在实际测试时需要针对待测器件设置相应的时序。

此外，有研究人员提出了其他测试方法，比较具有代表性的方法有：1）X 射线法，在特定温度下通过外部放射源的 X 射线照射 CCD 器件，产生一定数量的自由空穴-电子对，再测量工作于积分状态下的输出节点电压，求出 CVF 值[2-3]；2）均值-方差法（或称光子转移曲线法），利用输出信号所带噪声的统计学规律，在多个不同光强下测量 CCD 的输出信号幅度及噪声，进行 CVF 的计算[4]。

然而，上述方法存在以下不足之处。首先，三种方法均要求 CCD 器件工作在正常成像的状态下，然而每种 CCD 设计的工作时序都不相同[4]，对一款 CCD 的 CVF 参数测试需要具体情况具体分析，单独设计驱动电路，对不同的 CCD 的测试装置不能通用，因而不具备通用性。对于复位漏电流法而言，由于在正常成像时序中消隐区间的存在，CCD 的水平或垂直转移脉冲往往是非连续的，导致输出信号也并非连续，因此在实际测量中复位漏电流 I_{RD} 往往不是一个稳定值，因而最后计算获得的 CVF 值的准确性不易保证。此外，X 射线法和均值-方差法的测试结果均有可能存在较大误差，前者需要复杂的测试装置和较苛刻的测试环境，后者则测试工作量大，每只器件需要多次测试。

针对上述问题，本文进行了相关探索，开展了 CCD 电荷转换因子的测试方法和测试装置的设计研究，切实解决测试电荷转换因子的通用性技术，克服 CCD 电荷转换因子测试方法不通用、测试结果不稳定、测试流程复杂、测试精度差等问题，以提高其工作效率，推进测试工作的标准化和规范化。

2 通用测试方法的研究

电荷转换因子是指输出电压与存储在输出节点中电子数之间的比值[1,5]。单从定义来看，如果可以获取 CCD 的输出电压和存储在输出节点中的电子数，就能直接计算出该 CCD 的电荷转换因子。但在现有实际技术条件下，很难对存储在输出节点中的电子数进行直接测量，所以导致无法直接利用电荷转换因子的定义来计算电荷转换因子。

为了解决电荷转换因子的测量问题以及测量手段的通用性问题，需要从 CCD 的工作原理出发，设计一种与 CCD 具体工作状态（时序或其他物理参数）无关的计算方法。众所周知，现有的 CCD，无论其种类如何，都存在如下两个共同点：1）CCD 的工作流程一般都遵循“接受光照-光积分产生电荷-电荷转移-输出”的步骤；2）对于同一 CCD 而言，在其响应范围内，不同光照强度条件下，其输出是不同的[6]。由这两个特点可知，任何 CCD 的输出与光照强度大小存在线性关系，即光照强度越大，单位时间内 CCD 输出的电量越多，而电量可以换算成电子数，那么就可以根据不同光照强度条件下 CCD 输出电量的差值来间接反映电荷转换因子定义中的电子数，进而求得电荷转换因子。按照这一思路，对于电荷转换因子的计算方法有如下推导：

根据上文的共同点，在特定的驱动时序下，CCD 在相同光照强度下输出信号幅度可保持恒定不变。在这样的状态下，设在光照强度 1 条件下 CCD 输出信号的信号幅度为 V_{o1}，对应的输出放大器电荷量为 Q_1，在光照强度 2 条件下 CCD 输出信号的信号幅度为 V_{o2}，对应的输出放大器电荷量为 Q_2；e 代表单个电子的电荷量（1.6×10^{-19} C），令 $\Delta V_o = V_{o2} -$

V_{o1}，$\Delta Q=Q_2-Q_1$。按电荷转换因子的定义，其值可以表示为：

$$CVF=\frac{\Delta V_o}{\Delta Q} \tag{2}$$

设 CCD 输出信号的周期为 t，由于此时输出信号幅度恒定不变，则输出放大器的复位漏电流 I_{RD} 也应当是恒定的，根据电流电量公式 $I=Q/t$ 可知，$\Delta Q=\Delta I_{RD}\times t$，其中 $\Delta I_{RD}=I_{RD1}-I_{RD2}$，因此上式可变形为如下式子：

$$CVF=\frac{\Delta V_o}{\Delta I_{RD}\times t} \tag{3}$$

而单个像元的输出周期的倒数就是像元的输出频率，若用 f 代表像元的输出频率，则有 $f=1/t$，于是上式可改写为：

$$CVF=\frac{\Delta V_o}{\Delta I_{RD}}\times q\times f \tag{4}$$

对上式中的各个参数进行分析后可知，f 的数值取决于控制 CCD 输出的时序脉冲，为已知量，只要能够获得 ΔV_o 和 ΔI_{RD} 我们就能准确地计算出 CVF，而用于计算 ΔV_o 和 ΔI_{RD} 的参数均可用常规仪器设备量化检测，因此这样的计算方法完全可行。明确了计算方法后，还需要确定上述推导过程的前提，即设计一种特定的驱动时序，使得待测 CCD在相同光照强度下输出信号幅度保持恒定不变。

同样基于前文所述的“接受光照-光积分产生电荷-转移电荷-输出”的 CCD 基本工作原理，本文对此加以充分利用，设计了一种通用的时序，如图 1 所示。此处以一种两相驱动的 CCD 为例，AG 为抗晕栅，用于控制器件的光积分时间；TG 为转移栅，控制光积分产生的电荷转移至 CCD 内部的垂直区，V_1 和 V_2 为垂直转移栅，控制电荷由垂直区转移至水平区；H_1 和 H_2 为水平转移栅，RG 为复位栅，三者控制电荷转出水平区，并由输出放大器产生对应的电压信号[5]。该时序通过将 AG 置于低电平，使 CCD 保持在光积分状态，在恒定光照的条件下可持续不断地产生电荷。同时将 CCD 内部的三个转移栅 TG，V_1 和 V_2 置于高电平，使得每个转移栅都产生能够存储电荷的势阱，并且这些势阱相互连通，如此一来就形成了贯通 CCD 内部的恒定电场，这样做的目的是使之前由光积分产生的电荷能够均匀地分布在 CCD 的内部。通过水平转移栅和复位栅（H_1，H_2 和 RG）按图中时序产生连续不断且频率和相位固定的脉冲，便可将 CCD 内部的电荷均匀的输出，产生输出信号。此时 CCD 的输出信号波形如图 1 中 OS 所示，是输出幅度固定的连续脉冲信号。

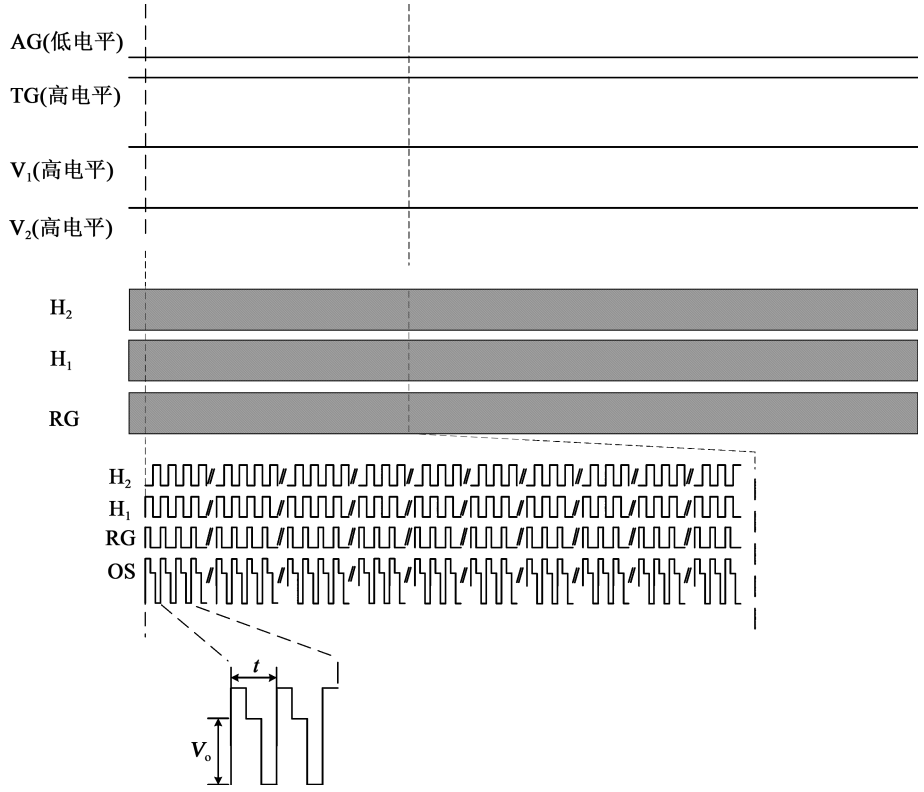


图 1　用于 CVF 测试的 CCD 工作时序示意图

图 1 给出的是一个示例性的时序，对于不同种类的 CCD，可能其控制栅的数量存在差异，也可能某些 CCD 具备一些独有的附加功能，但是不论何种 CCD，它们工作时所依据的主体原理是相同的。在实际应用中，只需根据 CCD 的控制栅数量及附加功能，按照图 1 的原则对控制脉冲进行简单修改，就能满足不同种类 CCD 的测试需求。例如，CCD 水平输出采用的是三相或者四相驱动，只需增加输出驱动信号的路数即可，又如 CCD 拥有垂直合并栅等，只需将其置为高电平即可。

经典的复位漏电流法需要为不同种类的 CCD 都单独设计驱动时序，而本文的方法具备理论上的通用性，不再需要进行复杂繁琐的驱动时序设计工作，只需根据控制栅的数量或附加功能对驱动电路作一些细微调整即可；与 X 射线法和均值-方差法相比，本文方法所测量的参数均可由常规仪器（电流表、后端图像采集软件等）直接测得，且避免了复杂的计算，测试过程简单高效。

3 基于通用测试方法的装置及测试结果分析

3.1 测试装置

根据前一节对测试方法的分析，可以设计一种具备通用性的 CVF 测试装置，具体设计的关键在于：1）确保 CCD 能按设计的时序工作，并且考虑对不同 CCD 的兼容性；2）确保测试数据能稳定采集。测试装置的总体结构如图 2 所示。

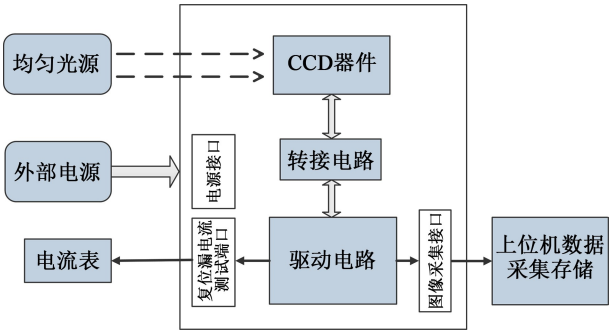


图 2 测试装置结构示意图

在图 2 所示的结构中，均匀光源由外部光照设备提供，并使用遮光材料阻挡外部的杂散光，使 CCD 能接受稳定的光照。驱动电路负责提供 CCD 工作所需的驱动信号，并进行 CCD 输出信号的采集。在驱动电路上设计一个提供 CCD 驱动信号的插槽，由插槽产生所需的驱动脉冲和直流电平，按照待测 CCD 的引脚定义，制作对应的转接电路来将驱动电路上的脉冲或电平接入 CCD 的引脚。在驱动电路的复位漏信号端引出测试端口，便于接入电流表。驱动电路还负责采集 CCD 的模拟输出信号，经过 AD 转换获得数字信号并编码传输给后端上位机采集软件。由于现场可编程门阵列（FPGA）器件具有灵活的可编程特性，因此在测试电路中采用 FPGA 产生驱动 CCD 器件所需的各路交流信号时序，以及 AD 转换、数据编码等处理时序。用上位机（即普通 PC）的图像采集软件采集测试电路的输出数据，测得输出信号幅值。

当实际测试时，利用光照设备给予待测器件稳定光照；电流表、电源、上位机等外围设备分别与测试装置的相应接口连接。然后上电启动测试装置，设置工作点后开始测试。在两种不同的光强下，利用上位机的软件得到 CCD 的平均输出信号幅值，利用电流表读出 CCD 的复位漏端的电流。代入计算公式，求得电荷转换因子。测试完毕后，关闭电源，插入下一个 CCD 重复上述步骤即可继续测试。

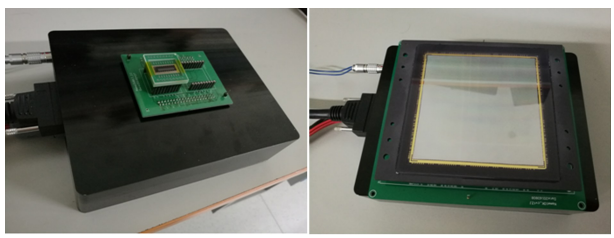


图 3 可兼容不同种类器件的测试装置

得益于本文测试方法的通用性，操作人员只需进行配置文件加载、器件插拔、数据记录等操作，测试效率明显提高，利于批量测试；并且对于不同类型的 CCD 器件，仅需设计转接电路即可兼容；利用装置中 FPGA 的可编程特性，CCD 器件的工作频率可灵活设置，装置具有可重用性。

3.2 测试结果

按照 3.1 节所述的测试装置和步骤，本文对不同器件的 CVF 进行测试，并与理论值进行对比。

表 1 是三种不同器件测试数据与其设计值的对比。在器件一栏中，编号“1，2，3”分别代表 128×20 有效像元可见光波段器件（工作频率为 250 kHz）、32×4 有效像元紫外波段器件（工作频率约为 83 kHz）、1 920×1 280 有效像元可见光波段器件（工作频率为 2 MHz）。三种器件均采用同一套 3.1 节所述的装置进行测试。考虑到在实际测试过程中，受电路噪声、仪器仪表读数偏差等因素的影响，

单独一次测试的结果可能存在误差，所以测试值采用多次测量后的平均值。

表 1　不同器件的 CVF 测试数据

器件	测试值/(μV/e$^-$)	设计值/(μV/e$^-$)	与设计值的偏差/%
1	0.383	0.380	0.8
2	0.394	0.400	−1.5
3	11.88	12	−1.0

表 2 是上述表格测试值一栏中，每种器件的每一次测试数据和平均值的偏差情况。

表 2　各器件测试数据与平均值的偏差

器件	测试值/(μV/e$^-$)	平均值/(μV/e$^-$)	与平均值的偏差/%
1	第一次测试值 0.374	0.383	−2.3
	第二次测试值 0.371		−3.1
	第三次测试值 0.398		3.9
	第四次测试值 0.389		1.6
2	第一次测试值 0.391	0.394	−0.8
	第二次测试值 0.393		−0.3
	第三次测试值 0.398		1.0
	第四次测试值 0.395		0.3
3	第一次测试值 11.86	11.88	−0.2
	第二次测试值 11.88		0.0
	第三次测试值 11.96		0.7
	第四次测试值 11.82		−0.5

根据上表测试结果与理论值的对比结果表明，本文的方法有较高的测试精度和稳定性，并且测试流程简单，针对各种器件的引脚数目、定义、体积尺寸等差异，都可采用同一套装置进行可配置化测试。

4　结论

本文提出的电荷转换因子新型驱动时序和测试方法，使 CCD 光敏区以电荷溢出方式往水平区转移电荷，水平区以固定频率不间断地转移输出电荷包，从而让 CCD 输出强度恒定的响应信号，通过复位漏电流与输出信号强度的对应关系计算出 CCD 器件的 CVF 值。并设计了一种适应各种 CCD 器件的通用测试装置，采用多款 CCD 进行了测试验证。测试结果表明，本方法测得的值和理论值偏差小，相较传统方法，有效提高了 CCD电荷转换因子的通用性、测试效率和稳定性。

参考文献：

[1] Janesick J R, Elliott T, Collins S, et al. Scientific charge-coupled devices[J]. Optical Engineering, 2001, 26(8): 692-714.

[2] 葛　钊，陈佳杰，李豫东，等. CCD 器件辐射损伤参数测试方法[J]. 上海航天，2015，32(2)：64-68.
Ge Zhao, Chen Jiajie, Li Yudong, et al. Parameter test method for radiation damage of CCD[J]. Aerospace Shanghai, 2015, 32(2): 64-68.

[3] 王小东，汪朝敏，李　佳，等. CCD 亚微伏电荷转换因子结构的设计与验证[J]. 光电子技术，2022，42(1)：28-31.
Wang Xiaodong, Wang Chaomin, Li Jia, et al. Design and experiment on low level charge to voltage factor structure of CCD[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(1): 28-31.

[4] Kameshima T, Ono S, Kudo T, et al. Development of an X-ray pixel detector with multi-port charge-coupled device for X-ray free-electron laser experiments[J]. Rev. of Scientific Instruments, 2014, 85(3): 033110.

[5] 王　颖，周建勇. 基于帧转移 CCD 的超高动态循环曝光控制技术研究[J]. 半导体光电，2022，43(3)：597-601.
Wang Ying, Zhou Jianyong. Ultra-high dynamic cyclic exposure control technique based on frame transfer CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(3): 597-601.

[6] Junichi Nakamura. 数码相机中的图像传感器和信号处理[M]. 徐江涛，高　静，聂凯明，译. 北京：清华大学出版社，2016.
Junichi Nakamura. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras[M]. Xu Jiangtao, Gao Jing, Nie Kaiming. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

[7] 孙　莉，邓　敏. CCD 图像传感器的现状及未来发展[J]. 现代制造技术与装备，2017，53(8)：160-161.
Sun Li, Deng Min. The current situation and future development of CCD image sensor[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017, 53(8): 160-161.

作者简介：

唐遵烈(1968—)，男，重庆市永川区人，本科，高级工程师，从事图像传感器成像电路技术研究。