

基于驱动时序控制 CCD 曝光时间的设计与实现

刘 慧^{1,2}, 刘学斌¹, 陈小来¹, 孔 亮¹, 刘永征¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 成像探测器, 提出了一种全新的, 通过驱动时序控制 CCD 曝光时间的方法。基于 Sarnoff 公司的高性能背照式帧转移型面阵 CCD 传感器, 通过软件控制驱动时序信号, 将一帧之内多余时间段的电荷迅速排放掉。在系统帧频为 100 fps 时, 测量了曝光时间分别为 2、4、6、9.96 ms(全曝光)条件下 CCD 的输出信号幅值变化情况, 并利用 Matlab 对连续输出 100 帧图像的平均灰度值进行分析计算。结果表明: 该方法有效地实现了 CCD 曝光时间的控制, 且仅通过软件调节, 易于实现, 可以广泛应用于不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 成像器件。

关键词: 曝光时间; 电子快门; CCD; 驱动时序; 控制

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0199-06

Design and implementation of CCD exposure time control based on driver timing

Liu Hui^{1,2}, Liu Xuebin¹, Chen Xiaolai¹, Kong Liang¹, Liu Yongzheng¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new method for exposure time control by driver timing was proposed for non-electronic shutter frame transfer area CCD imaging detector. Based on the Sarnoff's back illuminated frame transfer array CCD sensor, the charge will be drained quickly in the excess period, with the driver timing controlled by the software. Selecting exposure time as 2 ms, 4 ms, 6 ms and 9.96 ms, the CCD output signal amplitude was measured under system frame frequency of 100 fps. The gray value of continuous 100 frame image calculated by the Matlab. Results show that the method can control the CCD exposure time effectively, and can be implemented by software. It can be widely used in the frame transfer area CCD imaging device without electronic shutter.

Key words: exposure time; electronic shutter; CCD; driver timing; control

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(11327303, 61405239); 中国科学院创新交叉团队(空间高能宇宙辐射的探测与研究团队)项目

作者简介: 刘慧(1990-), 女, 硕士生, 主要从事 CCD 信号采集与处理方面的研究工作。Email: liu_hui1990@126.com

导师简介: 刘学斌(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱成像技术与信号处理方面的研究工作。Email: lxb@opt.ac.cn

0 引言

近年来,CCD 器件凭借其动态范围广、灵敏度高、光谱响应范围宽和噪声小等诸多优点在光电成像领域得到了广泛的应用^[1-2]。但是由于自然条件的影响,比如季节、天气、拍摄景物等特征的差异,造成光照强度变化较大,使成像系统的质量受到很大的影响^[3]。

视觉系统普遍采用高灵敏度、高分辨率的 CCD 相机,当光照充足的情况下,电荷溢出到相邻势阱,输出信号失真,图像容易过度饱和;相反,光照较弱,输出信号幅度小,获得的图像信息较暗,目标与背景不容易区分,从而影响了整个系统的成像质量^[4]。所以在光照变化较大的情况下,CCD 器件所拍摄的图像亮度受周围环境影响较大。文中从影响图像亮度的几个方面出发,通过分析研究,提出了一种全新的采用驱动时序控制 CCD 曝光时间的方法。

1 问题的提出与解决

1.1 问题分析

在一个成像系统中,图像亮度主要取决于以下 4 个因素:入射光强度、光圈大小、信号增益和曝光时间。用曝光函数可表示为:

$$B=f(E, F, G, T) \quad (1)$$

式中: f 为曝光函数; B 为图像亮度; E 为入射光强度; F 为光圈大小; G 为信号增益; T 为曝光时间^[5]。实际过程中,入射光强度随自然环境的改变而改变,属于不可控因素;光圈大小需要手动调节,不能方便控制;信号增益和曝光时间可通过软件方便地调节,但是改变信号增益不可避免地会引入噪声,使后续信号处理工作复杂化^[6],所以调节曝光是改变图像亮度的最佳方法^[7]。

目前,曝光时间的控制方法根据 CCD 是否自带电子快门主要分为两类:一方面,对于自带电子快门的 CCD 器件,利用电子快门通过修改软件进行调节是非常方便的^[8]。另一方面,对于不带电子快门的面阵 CCD 探测器,目前调节曝光时间的方法主要有两种,一是通过改变驱动主时钟频率的方法来进行,即展宽或压缩驱动时钟频率达到改变曝光时间的目的;第二个方法是采用增加行转移时间的方法来增大曝光时间,这两种方法带来的问题是 CCD 输出图

像的帧频随之改变,但在实际应用中,往往不希望帧频发生变化,这也是目前使用不带电子快门的 CCD 探测器所遇到的技术瓶颈。文中基于这个问题,对于不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 探测器,提出了一种全新的方法:即在系统帧频不变的情况下,通过改变驱动时序的方法来控制曝光时间。

1.2 设计思路

图 1 所示为电子快门工作时的势阱,CCD 相机在每一场的场正程期间只将某一段时间内积累的电荷作为输出的图像信号,其余时间的电荷在电子快门信号有效的情况下通过衬底被排放掉,这样,通过控制单个像素的电荷积累时间,进而调节入射光在 CCD 靶面上的作用时间来实现电子快门的功能^[9]。

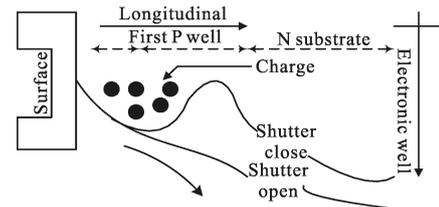


图 1 电子快门工作时的势阱

Fig.1 Potential well of electronic shutter

文中所采用的方法得益于电子快门电荷排放的原理,即通过控制驱动脉冲将一帧之中多余时间段内的电荷迅速排放掉。众所周知,不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 在正常工作时,一帧的工作周期按照感光区的工作状态可以分为曝光、帧转移两个阶段。当帧频及驱动时序周期确定之后,帧转移和水平读出时间也被确定,此时,若采用常规方法,则曝光时间也被唯一确定,在没有电子快门的 CCD 器件中,便不能调节其曝光时间。针对此问题,文中提出了一种全新的通过驱动时序控制 CCD 曝光时间的方法。即在帧频一定的情况下,一帧图像的工作周期如图 2 所示,可分为:水平读出、电荷排泄、感光积分、帧转移 4 个阶段,在水平读出阶段完成之后,先不进入下一帧感光阶段,而是进入当前帧的电荷排泄阶段,此段电荷排泄阶段设置的主要作用是将一帧之内感光区的富余时间通过一定规律的驱动时序来消耗掉,由于排泄阶段处于水平读出阶段之后,此时水平读出阶段积累的电荷也将在排泄阶段被排放掉,这样既解决了传统帧转移型 CCD 工作过程中最小

曝光时间为水平读出时间的问题,又可以根据实际需要设置曝光时间的长短,同时将此段时间产生的电荷完全排泄掉,为下一帧的曝光做好准备。

图 2 为一帧图像各阶段驱动时序示意图, A_1 、 A_2 、 A_3 和 B_1 、 B_2 、 B_3 分别为感光区和存储区 3 相驱动时序信号,其中曝光时间可以通过电荷排泄时间的长短方便地控制,为了减小 CCD 工作时的功耗,排泄阶段的驱动时序周期设置大于帧转移阶段。同时,复位信号一直处于复位状态,将产生的电荷迅速排放掉。

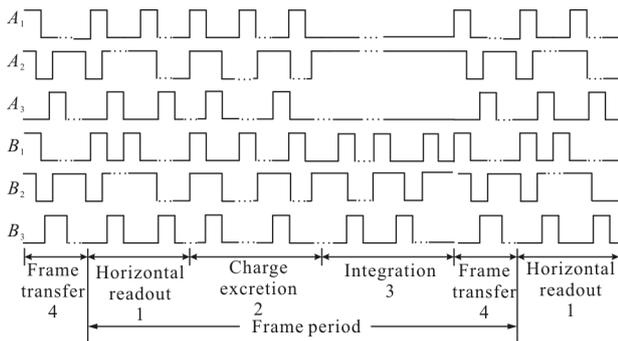


图 2 驱动时序示意图

Fig.2 Driver timing schematic diagram

2 方案设计

2.1 CCD 芯片介绍

文中可见光探测器是由 Sarnoff 公司生产的一款高性能背照式帧转移型面阵 CCD,分辨率 2048×256 , 像元大小 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 帧频最高可达到 1050 fps, 无电子快门。由图 3 可以看出:整个阵面由

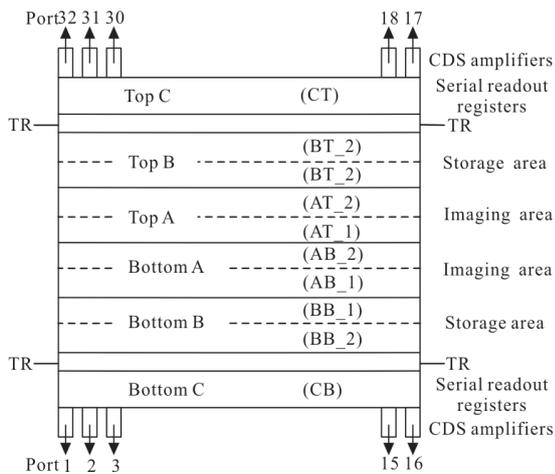


图 3 CCD 结构图

Fig.3 CCD block diagram architecture

上下两个子阵列组成,每个阵列含 2048×128 个像素单元,32 路模拟信号并行输出。

2.2 系统设计

在 CCD 驱动时序设计中,首先必须满足 CCD 探测器的基本需求,即 11 路驱动信号的产生,其包括感光区 3 路信号 A_1 、 A_2 、 A_3 , 存储区 3 路信号 B_1 、 B_2 、 B_3 , 水平读出 2 路驱动信号 C_1 和 C_2 , 求和信号 SUM 及复位信号 RET 和存储区到水平寄存器区转移信号 TR , 11 路信号时序关系需满足一定要求,图 4 为 11 路驱动信号仿真时序图。其中,输入信号为 50 MHz 的有源晶振,经分频计数产生其他 11 路驱动信号,信号间延时采用脉冲计数产生,一帧各状态之间通过状态机来实现。

从图 4 可以看出,CCD 一帧的工作时序依次为:水平读出、电荷排泄、感光积分和帧转移 4 个阶段。试验过程中,设置一帧时间为 10.0008 ms , 帧转移阶段感光区与存储区驱动脉冲周期均为 300 ns , 快速完成电荷从感光区到存储区的转移,水平读出信号周期为 50 ns , 电荷排泄阶段感光区与存储区驱动信号周期均为 $1.2 \mu\text{s}$, 水平读出信号周期保持不变。由于整个 CCD 阵列分为上下两个子阵列,为了保证数据信号的完整性,每个子阵列共有 136 行,包括 128 行有效数据,另外 8 行为无效行,其数据将被舍弃。帧转移的时间计算如下:

$$T_{\text{trans}_y} = 300 \text{ ns} \times 136 = 40.8 \mu\text{s} \quad (2)$$

若无排泄阶段,则一帧时间段内除帧转移时间段之外,其余时间均为曝光时间,则全曝光时间为:

$$T_{\text{exp}} = 10.0008 \text{ ms} - 40.8 \mu\text{s} = 9.96 \text{ ms} \quad (3)$$

水平转移周期为 50 ns , 每行共转移 155 个像元,其中包括 128 个有效像元,其余为哑像元、黑参考元及过渡像元,水平读出的时间为:

$$T_{\text{trans}_h} = (400 + 155 \times 50) \text{ ns} \times 136 = 1.1084 \text{ ms} \quad (4)$$

其中,水平读出过程中,存储区 B 相信号驱动时序周期为 $8.15 \mu\text{s}$, 配合水平移位寄存器区将电荷逐行转出,各项时钟配合工作,完成 CCD 探测器驱动时序设计。由于文中来源于某大型工程系统,使用环境光照强度变化缓慢,但亮暗幅度较大。在实际使用过程中,不要求根据外界光照强弱自动、实时地调节曝光时间,而是根据实际需要预置不同的曝光档位,然后人工控制通过上位机发送曝光时间指令,由串口接

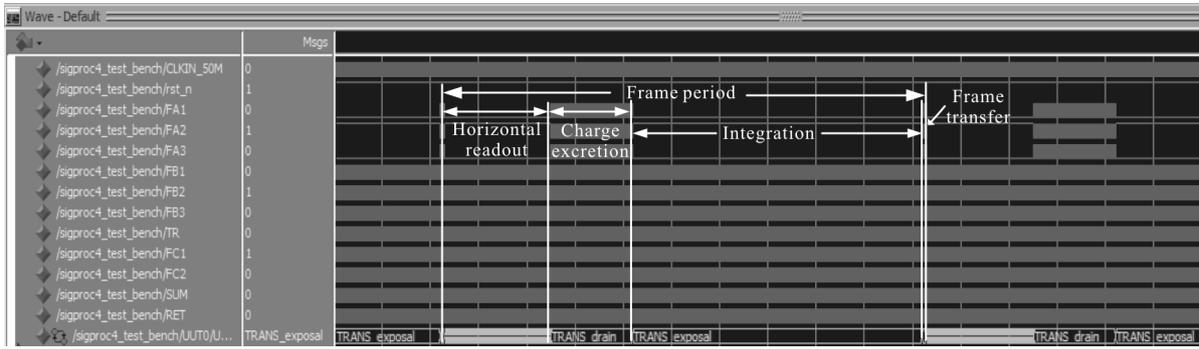


图 4 驱动时序仿真图

Fig.4 Simulation diagram of driver timing

收模块解析成曝光时间控制信号，传递给曝光时间控制模块来进行曝光时间的控制。

3 结果与分析

文中试验主要验证的问题是在系统帧频不变的情况下,对于不带电子快门的 CCD 探测器通过改变驱动时序可以达到控制 CCD 曝光时间的目的。如图5所示,为无排泄段时所测 CCD 驱动时序,其中,1 通道为感光区信号,2 通道为帧同步信号,3 通道为存储区驱动信号,由图 5 看出:其有效曝光时间为水平读出时间与感光积分时间之和,由于帧频与帧转移时间确定,曝光时间不可调。

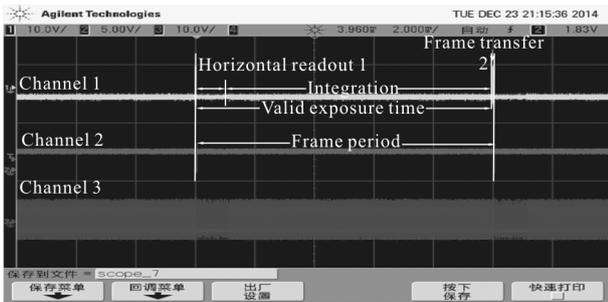


图 5 全曝光条件下驱动信号波形

Fig.5 Waveform measured in all exposure time

图 6 以曝光时间 4 ms 为例,为加入电荷排泄段时所测驱动时序信号,由图中可以看出:一帧之内感光区状态依次为水平读出、电荷排泄、感光积分、帧转移,其有效曝光时间为感光积分时间,虽然帧周期、水平读出时间和帧转移时间确定,但可以通过调节电荷排泄时间的长短,达到控制曝光时间的目的。

对系统加载 CCD 进行调试,采用均匀光源照射,四周以黑布遮盖,保证入射光均匀性,并且调节

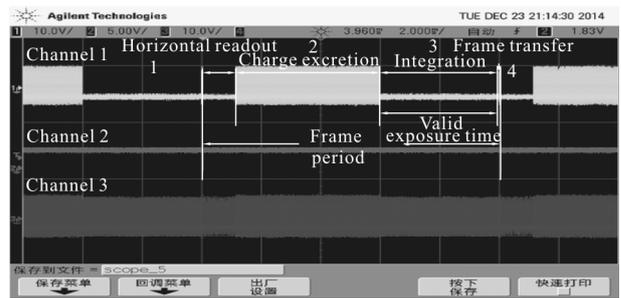
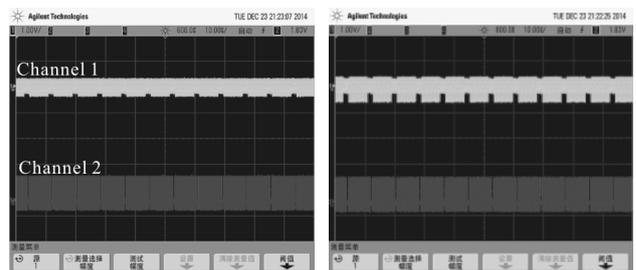


图 6 曝光时间为 4 ms 时实测波形

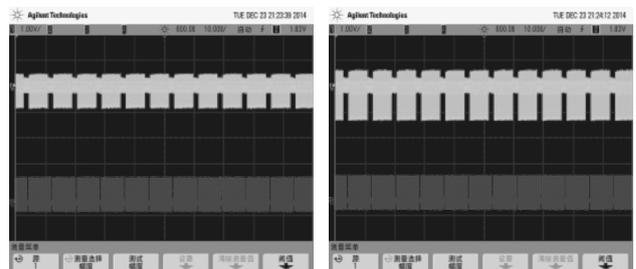
Fig.6 Waveform measured in exposure time of 4 ms

光源在合适亮度,分别测得曝光时间为 2、4、6、9.96 ms (全曝光)时 CCD 信号实测波形如图 7 所示。其中,1 通道为同一时刻水平读出段一段时间的 CCD 有效输出信号,2 通道为对应水平移位寄存器区驱动时序信号。可以看出:曝光时间的变化对 CCD 输出信号



(a) 2 ms

(b) 4 ms



(c) 6 ms

(d) 9.96 ms

图 7 不同曝光时间下采集的波形

Fig.7 Waveform captured in different exposure time

的影响符合实际情况,文中所提出的通过驱动时序控制 CCD 曝光时间的方法具有可行性。

表 1 给出了不同曝光时间下,排泄时间的长短和 CCD 输出信号幅值情况。可以看出,在帧频一定的情况下,曝光时间与排泄时间之和为定值,所以,可以通过调节 CCD 排泄时间的长短来控制曝光时间。同时,CCD 输出信号幅值随曝光时间的增大而增大,符合实际情况。

表 1 不同曝光时间下 CCD 输出信号幅值

Tab. 1 CCD output amplitude in different exposure time

Exposure time/ms	Excretion time/ms	Output amplitude/V
2.00	7.96	0.350
4.00	5.96	0.625
6.00	3.96	0.838
9.96	0.00	1.388

对整个系统进行测试,通过 Camera link 接口进行图像采集得到的曝光时间为 2、4、6、9.96 ms(全曝光)时输出图像如图 8 所示,整个 CCD 分为 32 路输出,图像较大,文中选取了 2 个通道的输出图像。由图中可以看出:同样均匀光源照射下,图像亮度变化有明显差异,且变化趋势与实际情况相符。

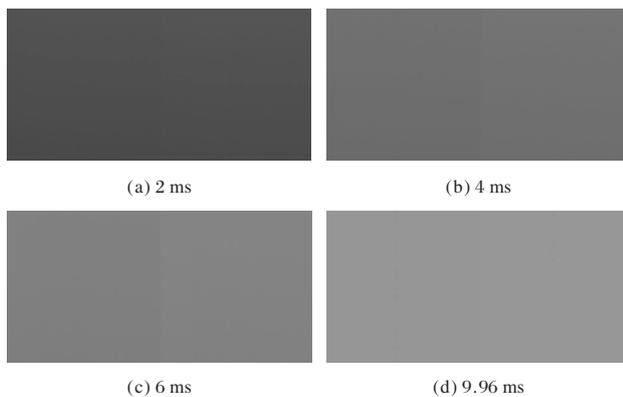


图 8 不同曝光时间下采集的图像

Fig. 8 Image captured in different exposure time

为了进一步验证文中所提出方法的有效性 with 合理性,采集连续 100 帧图像灰度值的裸数据,对其平均灰度值通过最小二乘法拟合之后曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出:平均灰度值随曝光时间基本呈线性变化,非线性误差为 4.61%。另外,由于光源、外围实验电路及其他客观条件的影响,实验结果存在一定误差。

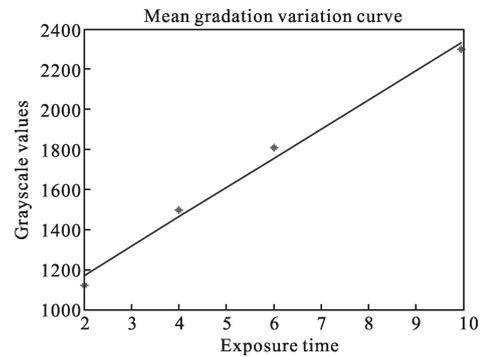


图 9 平均灰度值变化曲线

Fig. 9 Mean gradation variation curve

文中所提出的改变 CCD 曝光时间的方法,由于在一帧之中增加了排泄阶段,整个系统的功耗随之增大。为了降低功耗,可将感光区驱动时序脉冲周期适当增大。同时,排泄阶段存储区的驱动时序信号与感光区同步变化,也做出相应的调整。在帧频为 100 fps 的情况下,驱动时序信号周期增大至 19.2 μ s,曝光时间分别为 2、4、6 ms 时,系统总功率分别减少 7.76%、6.14%、5.31%。可见,排泄阶段的时间越长,增大驱动时序信号周期的效果越显著。在此基础上,当频率持续减小的情况下,整个系统的功耗几乎不再变化。

4 结 论

文中基于 Sarnoff 公司的高性能背照式帧转移型面阵 CCD 传感器,在帧频一定的情况下,能够通过改变驱动时序控制 CCD 的曝光时间。创新点在于对不带电子快门功能的 CCD 探测器,在帧频一定的情况下,首次提出了通过改变驱动时序信号来控制 CCD 曝光时间的方法,此方法有效地解决了不带电子快门的 CCD 探测器在帧频确定的情况下曝光时间无法控制的难题,并且克服了此类 CCD 探测器最小曝光时间为水平读出时间的不足。由于增加了排泄段,使系统功耗增大,在一定范围内,降低感光区与存储区驱动时序脉冲频率,系统功耗可有效降低。该方法基于电子快门原理,通俗易懂,设计简单,使用方便,可以广泛应用于不带电子快门的帧转移型面阵 CCD 探测器。

参 考 文 献:

- [1] Tetsuya Kuno, Hiroaki Sugiura, Narihiro Matoba. A new automatic exposure system for digital still cameras [J]. *IEEE*

- Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 192–199.
- [2] Ren Hang. High-resolution large area CCD camera frame rate design and its non-uniformity correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1491–1497. (in Chinese)
任航. 高分辨率大面阵 CCD 相机高帧频设计及其非均匀性的校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1491–1497.
- [3] Jin Longxu, Lv Zengming, Xiong Jingwu. Automatic light-adjusting system of CCD video camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 588–591. (in Chinese)
金龙旭, 吕增明, 熊经武. CCD 摄像机全自动调光系统[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(6): 588–591.
- [4] Gu Lin, Hu Xiaodong, Luo Changzhou, et al. Automatic adjustment of the exposure time of linear CCD based on CPLD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(12): 1533–1537. (in Chinese)
谷林, 胡晓东, 罗长洲, 等. 基于 CPLD 的线阵 CCD 光积分时间的自适应调节[J]. 光子学报, 2002, 31(12): 1533–1537.
- [5] Min Wuguo. The study of auto-exposure and auto-gain on CCD imaging electronics system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)
闵武国. CCD 成像电子学系统自动曝光和自动增益研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [6] Xu Wen, Gou Qiaoyun, Huang Zewen. A simple automatic exposure algorithm in machine vision [J]. *Mechanical & Electrical Engineering*, 2012, 41(03): 51–54. (in Chinese)
徐文, 苟巧云, 黄泽文. 机器视觉中的一种简单的自动曝光算法[J]. 机电工程技术, 2012, 41(03): 51–54.
- [7] Zhang Lei, Ding Yalin, Zhang Hongwen. New single curtain type shutter used on aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1815–1820. (in Chinese)
张雷, 丁亚林, 张洪文. 新型单帘航摄焦平面快门[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1815–1820.
- [8] Yang Yao, Gong Jing, Zhou Xudong, et al. Research on array CCD camera based on adaptive exposure [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(4): 655–657. (in Chinese)
杨耀, 龚婧, 周旭东, 等. 自适应曝光时间的面阵 CCD 相机的研制[J]. 半导体光电, 2010, 31(4): 655–657.
- [9] Wang Qingyou. The Application Technology of Image Sensor [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 176–178. (in Chinese)
王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 176–178.