

文章编号 1004-924X(2008)10-2038-07

半导体制冷型高帧频 CMOS 数字 摄像机及其成像噪声分析

孙宏海^{1,2}, 李泽学^{1,2}, 纪 华^{1,2}, 王大伟^{1,2}, 王延杰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了提高高速 CMOS 图像传感器的成像质量, 降低图像传感器暗电流和随机噪声, 介绍了采用半导体制冷方法设计的高帧频 CMOS 数字摄像机成像系统, 并针对该相机系统设计出结构一体化的多级半导体制冷器, 实现了制冷量可控。实验结果表明, 图像传感器制冷后的温度与环境温度的温差最大可达 40 °C; 通过降低传感器温度很大程度上减少了暗电流固定模式噪声和瞬态随机噪声; 此外, 在摄像机内硬件实现了彩色滤波阵列转换和列向非均匀性校正, 使输出图像信噪比提高了 6 dB。该相机系统具有集成度高, 结构紧凑, 高分辨率, 高帧频, 高信噪比, 宽动态范围, 成像质量好等特点。

关键词: 半导体制冷; 高帧频数字相机; CMOS 图像传感器; 图像噪声

中图分类号: TB853.1 **文献标识码:** A

High frame rate CMOS digital camera by semiconductor refrigeration and its imaging noise analysis

SUN Hong-hai^{1,2}, LI Ze-xue^{1,2}, JI Hua^{1,2}, WANG Da-wei^{1,2}, WANG Yan-jie¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,**Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: For improving the imaging quality of a high-speed CMOS sensor and reducing the dark-current and spatio-temporal noise of imaging sensor, the design of high frame rate CMOS digital camera system cooled by semiconductor refrigerator is introduced. For this camera cooling system, refrigeration quantity can be controlled by designed integrative multilevel semiconductor refrigerator. The difference of sensor cooling temperature and surroundings temperature can reach to at most 40 °C, and Fixed Pattern Spatial Noise(FPN) of dark current and random spatio-temporal noise can be reduced greatly by reducing the temperatures of CMDS sensors. In addition, Color Filter Array(CFA) conversion and nonuniform correction are implemented by hardware in camera, and the Signal Noise Ratio (SNR) of output image can be increased by 6 dB. Experimental results show that designed cooling camera system has many advantages in high density of integration, compact structure, high resolu-

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-03-30.

基金项目: 中国科学院三期创新工程基金资助项目 (No. O60Y32T060)

tion, high frame rate, high SNR, wide dynamic range, and high imaging quality.

Key words: semiconductor refrigeration; high frame rate digital CMOS camera; CMOS image sensor; image noise

1 引言

高帧频摄像机被广泛应用于工业自动化控制、科学研究和国防技术等领域,对高速瞬间变化场景的捕获、成像和记录发挥着重要作用。随着固体图像传感器的快速发展和广泛应用,高帧频的 CCD 和 CMOS 图像传感器逐渐引起人们的关注。CCD 图像传感器由于其像素串行顺序转移结构并不适合高帧频成像,所以 CCD 的高速摄像机很少有 $1\text{ k} \times 1\text{ k}$ 分辨率下达到 200 frame/s 以上的。CMOS 图像传感器的像素转移结构更适合高帧频摄像机的成像,目前已经有 $1\ 600 \times 1\ 200@1\ 000\text{ frame/s}$ 的高速 CMOS 图像传感器问世,但 CMOS 图像传感器的成像质量较 CCD 图像传感器稍逊一筹,主要原因是 CMOS 图像传感器存在着严重的固定模式噪声和瞬态读出噪声。虽然人们已经设计出优化的 APS 像元结构的 CMOS 图像传感器,但噪声问题仍然是当前 CMOS 图像传感器的主要问题。CMOS 图像传感器两种模式的噪声来源,主要是由于成像单元、像素复位、存储转移、跟随放大等结构单元在成像、转移、放大、量化过程中存在着入射噪声、热噪声和 $1/f$ 噪声。CMOS 图像传感器暗电流和列向输出放大器非一致性是固定模式噪声存在的主要原因。而这些噪声源大多都受传感器工作温度影响,这已经在前人的大量研究分析中被证实^[1-3]。目前科学级 CCD 相机大多采用制冷措施来降低相机的噪声,而制冷成像的 CMOS 相机研究却很少,因此本文采用了结构一体化的多级半导体制冷的方法对高帧频 CMOS 摄像机进行设计,进而对 CMOS 高帧频图像传感器进行了制冷成像试验,研究分析了 CMOS 图像传感器的工作温度对成像噪声的影响。

2 高帧频摄像机系统

2.1 高速摄像系统介绍

高速图像的拍摄不仅仅需要成像捕获设备,

还需要拍摄控制设备,图像记录设备和图像显示设备等。本文所设计完成的高帧频摄像机成像采集系统主要由高帧频数字摄像机,主控计算机,高速图像数据采集存储分配卡、高分辨率监视器、磁盘存储阵列五个主要部分组成,系统的原理如图 1 所示。

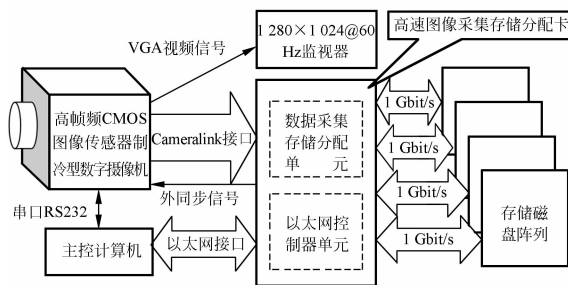


图 1 高速摄像系统原理图

Fig. 1 Block diagram of high-speed imaging system

系统工作过程如下,摄像机系统接收到主控计算机启动命令后,首先经由 RS232 串口进行摄像机的工作模式和参数初始化设置,并通过以太网接口控制存储记录系统做好存储的准备,由外同步信号控制高帧频摄像机开始拍摄,并同时启动多个存储磁盘阵列子系统进行高速图像数据的并行存储。高速景象拍摄过程前可以通过 VGA 监视器实时观看拍摄的目标。高速景象拍摄完成后可将记录的图像数据通过以太网接口下载到主控计算机中处理并保存,便于以后对高速图像进行判读和回放。

2.2 高帧频 CMOS 数字摄像机电子学系统^[4-8]

图 2 为高帧频 CMOS 摄像机电子学系统结构图,主要包括:成像单元(MI-MV13 CMOS 图像传感器);FPGA 时序生成控制单元;电源和图像数据输入输出接口单元。各组成部分的结构总线关系如图 2 所示。成像单元主要由 Micron 公司的 130 万像素 $1\ 280\text{ 像元} \times 1\ 024\text{ 像元}$ 500 frame/s 的高帧频 CMOS 图像传感器 MI-MV13 以及为其提供模拟参考电压的外围电路和光学镜头接口组成,模拟参考电压为 CMOS 图像传感器内部模数转换电路设定偏置和增益参考电平所

用。该相机系统采用 Nikon 公司的标准 F-mount 镜头接口,完全满足图像传感器成像靶面对角线 19.67 mm 的要求。时序逻辑控制单元是整个系统设计的核心,采用 Xilinx 公司高性能 FPGA Virtex-II Pro 来完成图像传感器驱动控制时序、各种串行接口总线、Bayer 彩色图像阵列转换、列向非均匀性校正功能模块和 VGA 视频输出接口控制模块的设计。接口单元包括: SXGA 标准模拟 RGB 视频信号输出接口,电源输入与相机控制接口,该接口单元包含直流电源的输入和 DC\DC 转换模块,由 RS232 串行接口向相机发送初始化工作参数和控制命令字,并且接口包含相机外同步触发信号的输入。

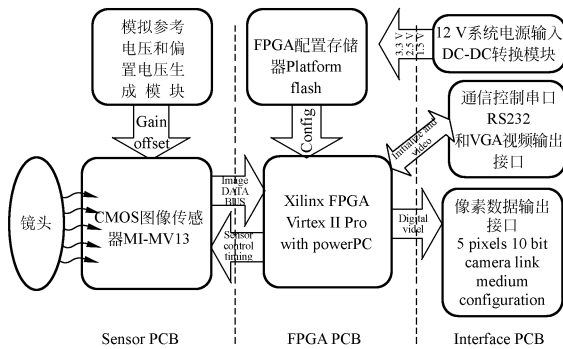


图 2 高帧频 CMOS 数字摄像机电子系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of electronic system of high frame rate CMOS digital camera

高帧频 CMOS 摄像机内主要发热器件有图像传感器、FPGA、偏置电压芯片、直流电源模块。CMOS 图像传感器功耗一般为 CCD 图像传感器的 1/10,但该系统的 CMOS 图像传感器工作时钟较高,最高达到 66 MHz,所以有一定发热量。系统设计中尽可能使用低功耗的 FPGA 和高能效的直流开关电源,来减少系统发热量。整个系统的发热量对图像传感器工作温度和成像性能有着重要影响。该系统设计的工作环境温度范围为 0~40 ℃,在非制冷条件下,摄像机工作一定时间后,摄像机内部图像传感器的工作温度要高于环境温度 10 ℃。在长时间高温工作条件下,图像传感器输出图像的噪声明显增加,因此有必要对摄像机系统和图像传感器进行制冷,来降低图像传感器工作温度。图 3 为摄像机电路板连接结构实物图。3 个电路板采用垂直方式连接,而没有采用水平层叠的方式,是为了减少电源模块和 FP-

GA 的热量向图像传感器传导,同时也方便制冷器的安装,能够直接从图像传感器背部进行制冷。

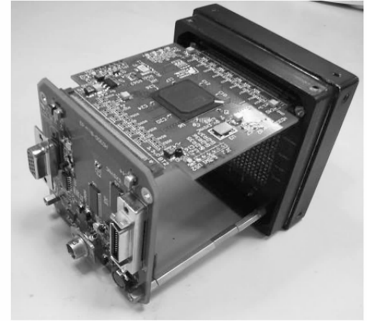


图 3 高帧频 CMOS 数字摄像机 PCB 实物图

Fig. 3 Photo of PCB in high frame rate CMOS digital camera

3 多级半导体制冷器设计

该高帧频摄像机的一个研究重点,就是采用强制冷的手段在 CMOS 图像传感器高帧频工作时对其进行制冷成像。设计中采用结构一体化的多级半导体制冷的方法,这种方式一般可以得到比环境温度低的相机内部温度。温度控制简单,可以采用电压或电流来控制半导体制冷器以获得不同程度的低温,控制灵活、启动快,并且半导体制冷片体积小,容易放入相机内部,直接对传感器进行制冷。

3.1 摄像机多级半导体制冷器

半导体制冷又称热电制冷或温差电制冷。半导体致冷器 (Thermal Electronic Cooler, TEC) 是由半导体所组成的一种冷却装置,于 1960 年前后才出现,然而其理论基础珀尔帖效应 (Peltier effect) 可追溯到 19 世纪。由于单级半导体制冷在一般应用条件下无法实现长时间大温差制冷,而且在较大的温差下工作时,它的制冷系数迅速下降,制冷工况迅速恶化,因此在要实现较大温差的场合,一般采用多级制冷^[9-10]。该系统制冷器设计的目的是高帧频摄像机系统处在常温 25 ℃ 环境中工作时,使得摄像机内部图像传感器被制冷到尽可能低的温度,因此设计中采用了串并联多级半导体制冷方式对制冷器进行设计。

实验中采用的半导体制冷片 (热电堆) 型号是 TEC12706,最大温差电流为 6.0 A,最大温差电压为 15.4 V,最大制冷功率为 51.4 W,最大温差

为 67° 。优值系数 Z 为 $2.3608 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, 外形尺寸为 $40.0 \text{ mm} \times 40.0 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 。摄像机系统内共采用 3 片半导体制冷片, 他们之间用 U 型导热铜连接进行导热, 这样保证了制冷的吸热装置位于摄像机的中心, 对其它热源也有较好的制冷作用。同时制冷器导热铜重量较大, 位于相机中心有利于相机机械结构的稳定和相机整体结构的安装。摄像机内部制冷导热结构如图 4 所示, 采用图像传感器背面接触制冷方式。该图像传感器封装为 $50.0 \text{ mm} \times 50.0 \text{ mm}$, 281 个金属引脚, 本实验应用导热系数大的绝缘导热硅胶将图像传感器、PCB 板和半导体制冷片 1 冷端紧密连接, 保证了足够大导热面积和较强的热传导能力, 半导体制冷片 1 热端与 U 型铜中部连接, 通过 U 型铜将热量导给左右两侧的半导体制冷片 2、3 进行二级制冷, 二级半导体制冷片 2、3 的热端散热分别采取液冷、空气自然对流冷却、风扇强制对流冷却等几种不同热交换形式, 最终将热量从摄像机内部导出。制冷装置安装过程中半导体制冷片表面涂有导热硅脂以减少接触热阻, 半导体制冷片端面空隙填充绝热性能良好的绝热胶。摄像机外壳接口连接处要采取一定密闭措施, 尤其镜头接口要密封好, 以防止图像传感器靶面凝露或结霜。摄像机内放置一定量的干燥剂, 减少相机内空气湿度, 防止电子元器件制冷后被凝露短路。图 5 为摄像机的光机电热机械结构设计的 3D 效果图。

本文中设计的多级半导体制冷结构, 采用的是初级半导体制冷和次级半导体串联方式, 并且他们之间并非直接接触导热, 设计中采用导热铜连接, 虽然对导热铜进行了一定的隔热处理, 但也会在摄像机内部吸收一定的热量, 这就要求次级半导体制冷片有更高的制冷量, 因此次级采用的是两片半导体并联的方式进行大制冷量方式制冷。根据参考文献[9-10]提出的两级半导体制冷器工作状态优化设计的方法, 初级的半导体制冷片的工作状态设计为制冷效率最大状态 ϵ_{\max} , 这样可以尽可能地减少初级半导体制冷片产生的焦耳热, 不给次级半导体制冷带来过重的制冷负载, 同时保证了足够大的对传感器直接的制冷量。所以试验中半导体制冷片 1 的工作电压为 5.03 V , 制冷时工作电流实测为 1.42 A , 已经非常接近参考文献[9]中提出最大制冷效率工作电流 1.49 A 。次级半导体制冷片 2、3 采用最佳工作状态 S

进行设计, 既具有较大的产冷量, 又具有较小的功耗, 从而使在此工作点工作的制冷器具有最佳的综合效益。试验中次级半导体制冷片 2、3 的工作电压为 12.24 V , 制冷时单片半导体制冷片工作电流实测为 3.58 A , 也接近参考文献[9]中提出最佳工作状态工作电流 3.68 A 。

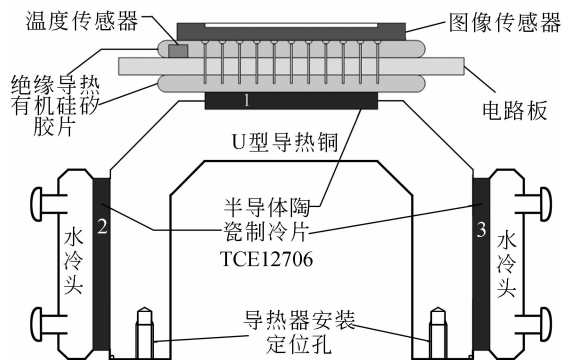


图 4 摄像机内部制冷导热结构图

Fig. 4 Configuration diagram of camera cooling system

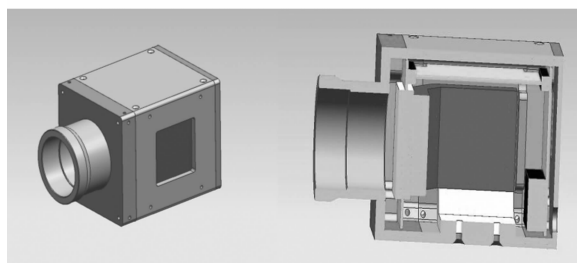


图 5 摄像机的光机电热机械结构设计的 3D 效果图

Fig. 5 3D picture of camera mechanism structure

3.2 制冷试验及结果分析

实验 1: 热端风冷系统制冷试验。在两侧半导体制冷片热端各有一个铜散热翅片。尺寸为 $88.0 \text{ mm} \times 67.5 \text{ mm} \times 12.0 \text{ mm}$, 翅厚 0.5 mm , 翅片间距 1.0 mm 。每个散热片上均有一个 12 V 0.8 A 的涡轮风扇, 对两侧热端散热翅片进行强迫对流换热。安装后实物如图 6 所示。

实验 2: 热端液冷系统制冷试验。在两侧半导体制冷片热端各有一个 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 铜制冷头; 冷却液导管为内径 8 mm 的硅胶圆管; 12 V 、 3 W 的 SC-300 型循环泵, 扬程 1.5 m , 冷却液流量 300 L/h 。使用 Syscooling 公司的专用导热液, 工作温度在 $-30 \sim 99 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水冷热端空气强制对流热交换器型号为 240D12, 尺寸为 $240 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, 带有两个 120 mm

×120 mm×25 mm 12 V 3.6 W 强制风扇,增强散热效果。安装后实物如图 7 所示。



图 6 风冷摄像机系统实物照片

Fig. 6 Photo of wind cooling camera system



图 7 液冷摄像机系统实物照片

Fig. 7 Photo of liquid cooling camera system

通过试验 1 和试验 2 证明文中的多级半导体制冷器的设计是成功的,可以使图像传感器工作温度最低制冷到 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$,热端风冷和液冷制冷效果试验曲线如图 8、图 9 所示。图 8 为制冷开始前 10 min 制冷温度曲线,图 9 为制冷 10~60 min 的温度曲线。试验说明热端液冷方式可以获得更低的制冷温度,但一般环境下为了保证不超出图像传感器厂家要求的长时间稳定工作的温度范围 $-5\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,建议采用风冷方式。

CMOS 图像传感器本身功耗最高为 500 mW,相机内其它器件如 FPGA 和电源模块可能是更大的热源,功耗大约在 2 W,而系统制冷器的功率约为 90 W,虽然制冷效率并不高,但是实验获得了与环境温度较大的 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差。所以本文设计的多级半导体制冷器适于对本文设计的低功耗高帧频摄像机系统进行大温差制冷。该摄像机制冷系统还可以进行改进,如改用热管代替导热铜,对摄像机壳体进行更严密的密封后对内部腔体进行抽真空,将会使图像传感器制冷到更低的温度。

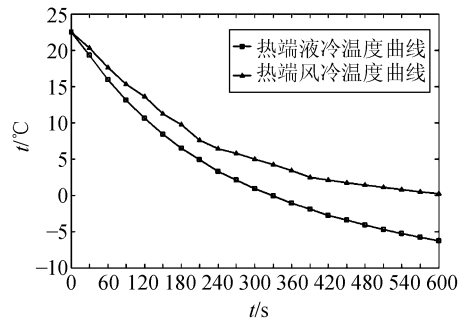


图 8 制冷 0~10 min 温度曲线图

Fig. 8 Temperature curves of camera cooling from 0 to 10 min

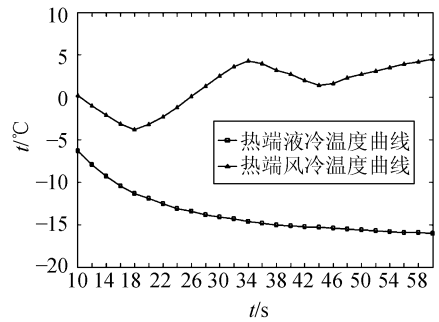


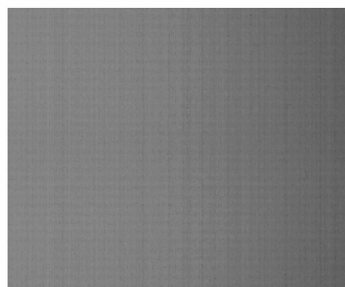
图 9 制冷 10~60 min 温度曲线图

Fig. 9 Temperature curves of camera cooling from 10 to 60 min

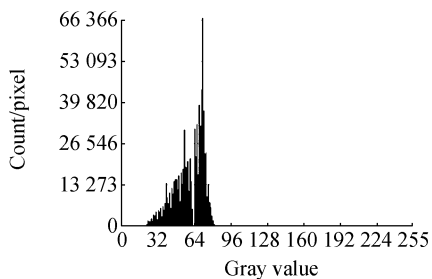
4 制冷成像噪声评估分析

制冷试验证明,降低 CMOS 图像传感器的温度可以减少随机噪声和削弱暗电流固定模式噪声,在环境温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,图像传感器非制冷状态下工作温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,采集成像系统暗电流固定模式噪声图像,其平均灰度等级在 59,如图 10 所示;当图像传感器低温制冷到 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,该暗电流固定模式噪声图像的平均灰度等级降低到 30,如图 11 所示。说明低温制冷后,暗电流固定模式噪声等级可以降低 50%左右。

图 12、13、14,是非制冷和制冷后采集的原始图像,与进行了 Bayer 阵列转换的彩色图像和非均匀校正后的对比图像。制冷前非处理图像的信噪比为 48 dB,制冷后经过图像增强去噪处理,信噪比提高到 54 dB。按照参考文献[11]提出的计算相关噪声的方法来评估瞬态随机噪声,试验 2 中制冷后瞬态随机噪声减少 90%以上。



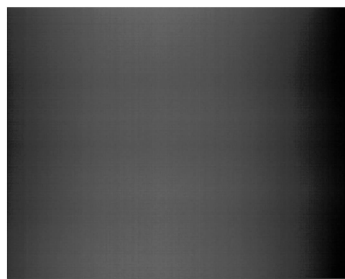
(a) 噪声图像
(a) Noise image



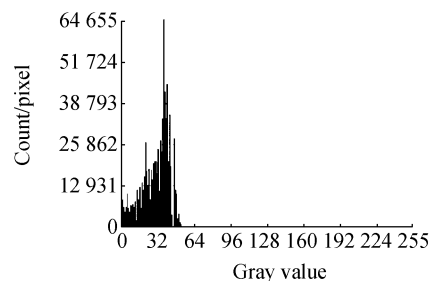
(b) 直方图
(b) Histogram

图 10 非制冷状态下基地暗电流固定模式噪声图像及其直方图

Fig. 10 Image and histogram of dark current FPN of camera



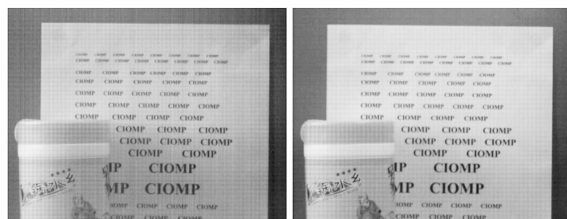
(a) 噪声图像
(a) Noise image



(b) 直方图
(b) Histogram

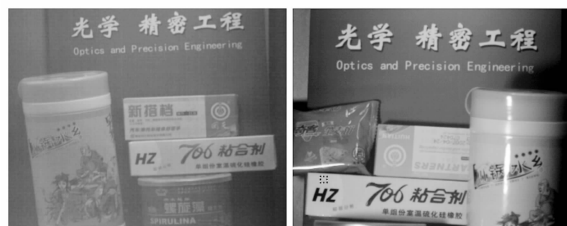
图 11 低温制冷状态下基地暗电流固定模式噪声图像及其直方图

Fig. 11 Image and histogram of dark current FPN of cooling camera



(a) 非制冷 (a) Without cooling
(b) 制冷后 (b) With cooling

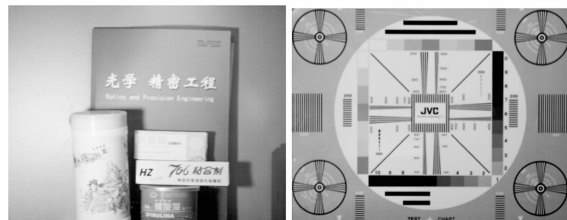
图 12 非制冷和制冷后采集原始数据图像对比图
Fig. 12 Comparison of original images with and without cooling camera and cooling camera



(a) 非制冷 (a) Without cooling
(b) 制冷后 (b) With cooling

图 13 非制冷和制冷后采集的图像进行 bayer 彩色阵列转换后彩色图像对比图

Fig. 13 Comparison of color images with and without cooling camera



(a) 实物图像 (a) for real objects
(b) 测试卡图像 (b) for test card

图 14 成像系统低温制冷并应用非均匀校正算法处理后的高质量实物图像和测试卡图像

Fig. 14 High quality images after camera cooling and nonuniform correction for real object and test card

5 结 论

本文所设计的半导体制冷型高帧频摄像机实现了通过自定义 CameraLink 5×10 bit 接口最高 300 frame/s 输出全幅数字图像(1 280×1 024)的输出,并且通过 AOI 方式缩减图像采集

分辨率的大小来提高帧频,实现 640×480 1 200 frame/s 10 bit 数字图像输出。实现了 60 frame/s SXGA 彩色 RGB 图像 VGA 接口输出,相机内部硬件实现了 Bayer 彩色图像阵列的转换和图像非均匀性校正,从而使得相机能够以最小延迟时间

实时地直接输出彩色图像到 VGA 监视器上,给工程项目的装调测试带来极大的方便。本文设计的多级半导体结构一体化制冷器,降低了图像传感器的成像噪声,提高了图像传感器输出图像的信噪比。

参考文献:

- [1] TIAN H, FOWLER B, GAMAL A E. Analysis of temporal noise in CMOS APS[C]. *Sensors, Cameras, and Systems for Scientific/Industrial Applications Conference, San Jose CA, Proceedings of SPIE*, 1999, 3649: 177-185.
- [2] YADID P O, MANSOORIAN B, FOSSUM E, et al.. Optimization of noise and responsivity in CMOS active pixel sensors for detection of ultra low light levels[J]. *SPIE*, 1997, 3019: 125-136.
- [3] MENDIS S K, KEMENY S E, GEE R C, et al.. CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems[C]. *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 1997, 32(2): 187-197.
- [4] HILLEBRAND M. High speed camera system using a CMOS image sensor[C]. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000: 656-661.
- [5] SUN H H, CAI R T, WANG Y J. Design and implementation of high-speed digital CMOS camera driving control timing and data interface[C]. *Sixth Intl. Symp. on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation. Proc. of SPIE*, 2006, 6358: 63580C.
- [6] 沈宇键, 郝胜国, 郝志航. 高速 CCD 数字相机接口设计的 VHDL 逻辑综合的应用[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2): 154-160.
SHEN Y J, HAO SH G, HAO ZH H. VHDL logic synthesis and implementation for high-speed digital CCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 154-160. (in Chinese)
- [7] 杨少华, 李斌康, 冯兵, 等. 高速高分辨率 CMOS 图像采集系统设计与实现[J]. *光电工程*, 2006, 33(11): 133-136.
YANG SH H, LI B K, FENG B, et al.. Design and implementation of a high speed high resolution CMOS imaging acquisition system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(11): 133-136. (in Chinese)
- [8] 顾晓, 高伟, 马冬梅, 等. 基于 CMOS 图像传感器 IBIS5-A-1300 的成像系统设计[J]. *科学技术与工程*, 2005, 14(5): 967-970.
GU X, GAO W, MA D M, et al.. Imaging system based on CMOS image sensor IBIS5-A-1300[J]. *Sci. Tech. Engng.*, 2005, 14(5): 967-970. (in Chinese)
- [9] 齐臣杰, 卞之, 刘杰. 半导体制冷器优化设计工作状态的实验研究[J]. *低温工程*, 2007, 155(1): 43-46.
QI CH J, BIAN ZH, LIU J. Experimental study and theory analysis of semiconductor refrigerator optimization design working status[J]. *Cryogenics*, 2007, 155(1): 43-46. (in Chinese)
- [10] 李玉东, 李茂德, 李伟江. 两级半导体制冷性能优化设计[J]. *应用能源技术*, 2006, 101(5): 11-14.
LI Y D, LI M D, LI W J. Optimal design on performance of two-stage semiconductor cooling[J]. *Applied Energy Technology*, 2006, 101(5): 11-14. (in Chinese)
- [11] 张加深, 金伟其, 刘广荣, 等. 一种基于相关处理的制冷 CCD 系统噪声评估方法[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(8): 713-717.
ZHANG J SH, JIN W Q, LIU G R, et al.. A method based on relative processing to evaluate the noise of cooling CCD camera[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(8): 713-717. (in Chinese)
- [12] HYTTI H T. Characterization of digital image noise properties based on RAW data[J]. *SPIE*, 2005, 6059: 60590A.

作者简介: 孙宏海(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高帧频数字相机和实时数字图像处理的研究。E-mail: shh426@gmail.com

导师简介: 王延杰(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事数字图像实时处理系统的研制和开发。E-mail: wyjciomp@gmail.com