

《空间光学遥感器》专题文章导读

刘金国

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

以空间站和卫星为空间飞行平台,利用立体测绘相机进行航天摄影,对地球表面进行立体测量,可以提供包括数字地形图、数字正射影像图、数字高程图(DEM)、三维地形景观图等测绘产品,因此,立体测绘相机在国土测绘、资源普查、自然灾害监测、土木工程和城市规划、通讯视线测定、飞行模拟等领域有广泛的应用前景,对促进我国的国民经济建设和数字地球的实现有着重要的实际意义,其中 CCD 立体测绘相机在地球摄影测量中受到越来越多国家的重视,已成为地外星球摄影测量的主要传感器。而测绘相机性能的提高,对系统结构设计、可靠性、热控设计等也提出了新的要求。本专栏论文主要涉及到透射、反射式光学元件支撑结构的设计、分析、装配及试验验证;面阵 CCD 的特殊工作模式应用设计;高可靠性星载嵌入式软件的设计、测试方法等针对测绘相机技术需求的研究与应用。

《面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的高速驱动系统设计》一文,采用脉冲宽度调制技术实现 CCD 驱动,以高速运放驱动对信号沿建立时间要求高的负压信号,达到了高速驱动的要求。

《行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究》一文,针对在面阵 CCD 相机和目标间存在快速相对运动时曝光不足导致图像信噪比低的问题,出面阵 CCD 的 TDI 工作方式实现方法,设置合适的 TDI 级数,使图像质量有很大提高。

《基于混合编程的空间相机控制器的自检方法》一文,提出了 DSP 空间相机控制器自检方法,降低了像移计算的实现难度,给出的自检算法的验证方法在工程应用中实用有效。

《大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计》一文,提出采用不同的柔性环节独立约束反射镜自由度的设计思想,经工程分析优化设计参数,降低了反射镜面形变化,满足了运载发射的冲击和振动力学条件。

《测绘相机光学镜筒设计、加工及装配》一文,精心选取材料,经工程分析优化结构,设计出薄壁壳体透镜支撑结构,加工、装配后镜头光学传递函数达到 0.43(77 lp/mm)。

《星载嵌入式软件测试过程模型的研究》一文,针对星载嵌入式软件的可靠性要求,提出适用于软件测试过程的蝴蝶模型,适用于星载嵌入式软件研制多周期的特点,对保证软件可靠性提供了有力支持。

文章编号 1004-924X(2008)09-1622-07

面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的高速驱动系统设计

刘金国¹,余 达^{1,2},周怀得¹,李广泽¹,吕世良¹,孔德柱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:介绍了行间转移面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的内部结构和驱动时序,采用新方法和低成本器件设计了该 CCD 芯片的驱动电路,把电源和电机控制的脉冲宽度调制技术引入 CCD 驱动电路,采用超高速运放驱动高速负压信号以减小其上升沿和下降沿时间,达到高速低成本驱动要求,解决了驱动设计中的技术难点。实验结果表明,此 CCD 驱动系统采用低成本的器件,性能好、成本低、能够同时输出两路 CCD 电压信号,数据输出速率达 15 frame/s,满足空间测绘相机的系统设计要。若进一步改进电路,数据输出速率可达 27 frame/s。

关键词:CCD 芯片;KAI-1010M;高速驱动电路;脉冲宽度调制

中图分类号:TN386.5;P231 **文献标识码:**A

收稿日期:2008-02-26;**修订日期:**2008-03-28.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

Design of high speed driver system for area-CCD KAI-1010M

LIU Jin-guo¹, YU Da^{1,2}, ZHOU Huai-de¹, LI Guang-ze¹, LÜ Shi-liang¹, KONG De-zhu¹

(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: After introducing to the inner structure and the driver timing of a interline area-CCD KAI-1010M briefly, a high speed and low cost CCD driver circuit used in digital space survey camera was designed in a new way. In order to resolve the technical difficulties, the pulse width modulation technology usually used in power supply and motor control was introduced into the CCD driver circuit and a ultra-high speed operational amplifier was adopted to reduce the rise time and fall time of high speed negative signal. Experimental results show that the CCD driver system can output two groups of CCD signals simultaneously at data output speed of 15 frame/s, which can meet the requirements of the camera system because of its good function and low cost. If the circuit is improved further, the CCD driver system can output two groups of CCD signals at data output speed of 27 frame/s.

Key words: CCD chip; KAI-1010M; high speed driver circuit; pulse width modulation

1 引言

CCD 具有信号输出噪声低、动态范围大、量子效率高以及电荷转移效率高等优点^[1],其应用已从可见光扩展到了紫外甚至 X 射线^[2-3]。作为获取图像的关键器件,CCD 目前已广泛应用于各个领域^[4-5]。根据阵列排布方式的不同,CCD 成像器件分为线阵和面阵两大类。

在以往的空间测绘中,线阵 CCD 器件工艺技术相对成熟,价格比较低廉,使用起来比较方便,应用也较为广泛。随着现代技术的发展,面阵 CCD 器件工艺技术得到了很大提高,价格也大幅度下降,同时空间测绘的要求逐步提高,面阵 CCD 器件在空间测绘领域也越来越受重视。

CCD 图像传感器对相机的性能起非常关键的作用,因此,实现 CCD 驱动电路是空间测绘相机系统设计的关键之一。CCD 驱动电路主要由驱动时序产生电路、偏置电压产生电路和驱动器电路组成^[6]。面阵 CCD 的驱动电路设计比线阵 CCD 复杂,需采用新方法来满足其高速低成本的要求。

2 KAI-1010M 的内部结构及驱动时序简要分析

KAI-1010M 是 1 M 像素的行间转移 CCD 图像传感器,其内部结构如图 1 所示。KAI-1010 包括 1 024×1 024 个光电二极管、1 024 个垂直移位寄存器,以及独立双输出结构的水平移位寄存器^[7]。

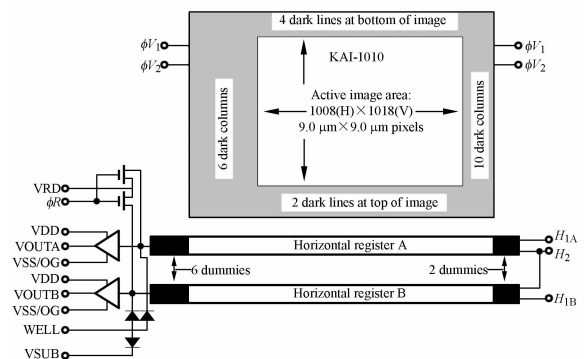


图 1 KAI-1010M 内部结构示意图

Fig. 1 Inner structure of KAI-1010M

CCD 工作时,首先衬底出现快门脉冲,随后

开始图像信号光积分阶段,接着 ΦV_1 上的高电平把光敏区的感应图像信号快速由一列成像单元转移到相邻的一列存储单元,接下来通过 ΦV_1 和 ΦV_2 上的时钟把存储区的电荷逐行转移至水平移位寄存器,最后通过 H_{1A} 、 H_{1B} 、 H_2 和 ΦR 的时钟把水平移位寄存器上的图像信号电荷包逐个转移到浮置扩散输出节点。浮置扩散输出节点的电势随每包中的电荷量呈线性变化。复位时钟(ΦR)移除浮置扩散节点的电荷,复位其电压到复位漏极电压(V_{RD})。

3 驱动系统设计

CCD 芯片驱动电路系统框图如图 2 所示。价格低廉的 LC4256V 芯片是这一驱动系统的核心器件,它产生符合 CCD 芯片频率和相位要求的时序信号。由于 LC4256V 产生的时序信号为正电压且驱动能力有限,需经驱动器件驱动后方可加到 CCD 芯片上。CCD 输出的信号为带有固定图像噪声和暗电流的模拟信号,采用相关双采样法可以使 KTC 噪声等效电子数从几百个减小到十几个甚至更小^[8],且电路简单易集成化^[9]。相关双采样、可控增益放大和模/数转换,这些工作由视频预处理芯片 VSP2262 来完成。

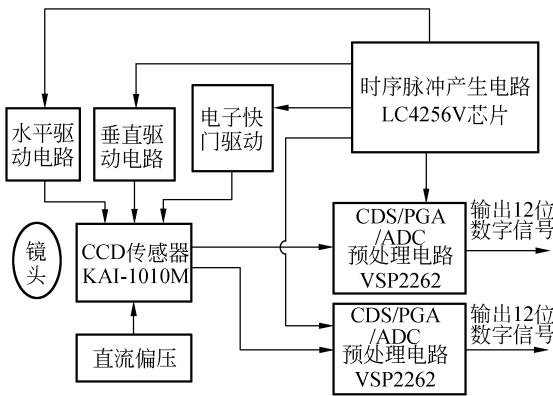


图 2 CCD 驱动电路系统结构图

Fig. 2 Structure of CCD driving system

3.1 面阵 CCD 驱动时序的 VHDL 描述

由于面阵 CCD 相机驱动时序的复杂性,选用硬件描述语言 VHDL 设计 CCD 时序。VHDL 采用自顶向下的设计方式,具有很强的系统硬件描述能力和系统仿真能力^[10-11]。设计复杂的

CCD 驱动时序,关键是如何使用 VHDL 语言来描述 CCD 时序关系。

整个程序是一个多进程结构,每个输出信号的时序关系都在一个进程中描述。由于各输出信号都是周期性信号,故在各信号的一个周期内描述其高低电平变化,为避免毛刺产生采用同步时序设计,所有的高低电平变化都是在参考时钟的上升沿完成,仿真结果如图 3 所示。

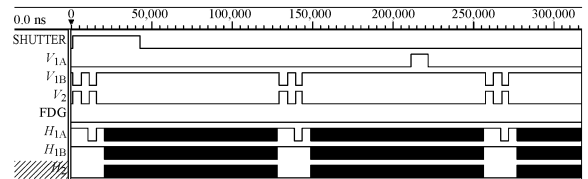


图 3 CCD 仿真时序图

Fig. 3 Simulated timing diagram of CCD

3.2 CCD 偏置电压的设计

VRD 的电压经电阻分压和大电容滤波获得,其余电压直接由电源提供。

3.3 驱动电路主要难点的解决

面阵 CCD 驱动电路设计的难点:(1)信号的种类多,包括帧、垂直和水平转移信号等;(2)电子快门要求衬底电压平时为 7~15 V,快门期间峰值瞬间变为 40 V;(3) V_1 的三电平工作状态(高 +9 V,低 -9 V,中间电平为 0 V);(4)工作电压的低电平多为负压,集成驱动器不能在负压下工作;(5)电压值不规范,高电平值分别为 0 V、+5 V、+3 V,低电平值分别为 -9 V、-6 V、-7 V;(6)复位脉冲为负压,且脉冲宽度极窄(10 ns 左右),要求其上升沿和下降沿时间短。前三项在一般线阵 CCD 驱动电路设计中从未遇见过。

3.3.1 负压驱动

常见的驱动芯片不能在负压下工作,负压的驱动方法有 3 种:

(1)采用三极管驱动,适合上升沿和下降沿要求不高的控制信号。如图 4 所示,当输入 FDG_IN 为高时,三极管 Q_1 (8550)处于截止状态,输出 FDG_OUT 电压为 -6 V;当 FDG_IN 为低时, Q_1 处于饱和状态,FDG_OUT 电压为 +5 V。

(2)采用驱动芯片正压驱动后经交流耦合、箱

位输出,适合上升沿和下降沿要求较高的控制信号。如图 5 所示,信号 V_{2_IN} 经 U_5 驱动,经电容 C_{21} 耦合,再经二极管 D_4 箝位后,输出信号 V_{2_OUT} 的高、低电平分别为 0、-9 V。

(3)采用超高速运放驱动,适合对信号上升沿和下降沿要求极高的控制信号。如图 7 所示, U_2 对输入信号 RW 进行反相放大,输出信号 R_OUT 为与 RW 成线性比例的反相信号。

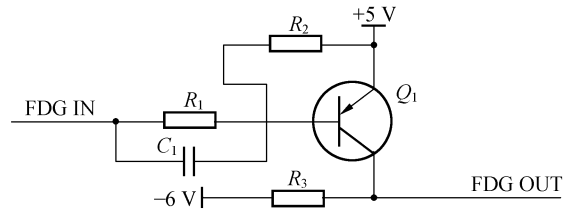


图 4 负压的三极管驱动方式

Fig. 4 Driving way of negative voltage by using BJT

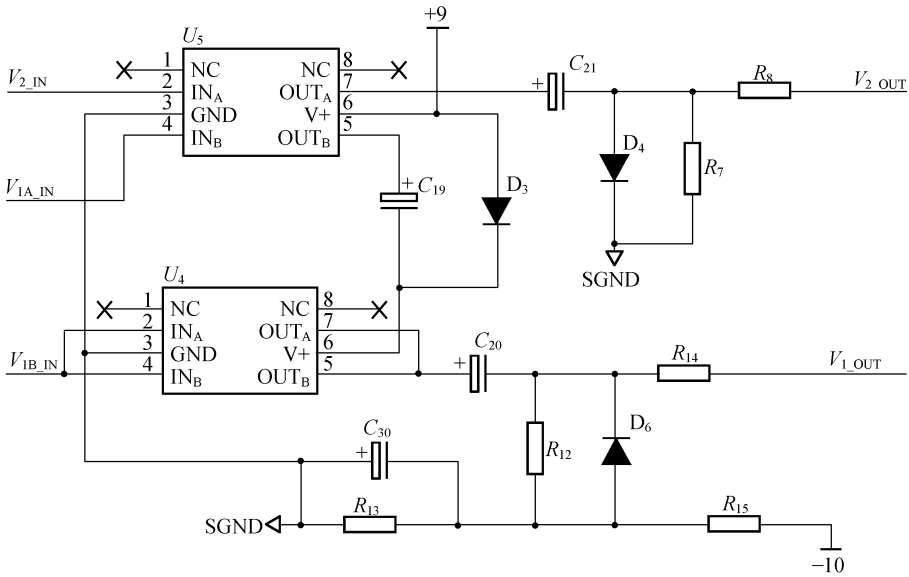


图 5 三电平的驱动器驱动方法

Fig. 5 Driving way of three-state voltage by using drivers

3.3.2 三电平状态(零电平、正、负电平)驱动

V_1 信号具有 3 种电平状态(零、正和负电平),同时电平幅值较高(高电平+9 V,低电平-9 V)。如图 5 所示,当 V_{1A_IN} 为高电平时, U_4 产生峰峰值为 9 V 的输出信号;当 V_{1A_IN} 由高变低时, U_4 的电源端被升压到 18 V,使 V_1 产生出三电平信号。

3.3.3 高速窄复位信号的纳秒级脉冲宽度调节及驱动

复位脉冲信号的典型宽度为 10 ns,可根据实际应用环境对其宽带进行调节。产生此窄脉冲的方法为:(1)使用工作频率极高的可编程逻辑器件,采用主时钟计数,令其在某些时间段输出高电平。此方式输出脉冲的最小宽度与计数时钟频率成反比,欲对脉宽实现纳秒级调节,则计数时钟频

率至少应为 1 GHz,如此以来必定增加成本;(2)使用专用脉宽发生器^[12],如 DALLAS SEMICONDUCTOR 的 DS1040,但其输出脉宽只有几种固定值,且不易购买;(3)采用脉宽调制电路。一种方式是把输入的同频方波信号积分成三角波,再与一基准电压送入高速比较器进行比较,通过改变基准电压来改变输出脉宽,但此种方式电路复杂。下面介绍本系统采用的一种经济实用方式:采用与非门、电阻和电容实现。如图 6 所示,当 R_IN 为 ‘L’ 时, RW 为 ‘H’, U_{1A} 输出为 ‘H’, 电容 C_3 端子电压经充电后变为 ‘H’; 当 R_IN 为 ‘H’ 时, U_{1A} 输出为 ‘L’, 电容 C_3 上的电荷经 SW_2 放电,在 C_3 上的电压未降到门限电压之前 RW 为 ‘L’, 之后 RW 恢复为 ‘H’, 即在 R_IN 的上升沿输出一个低电平脉冲,脉宽为 $T \approx RC$ ^[13]。

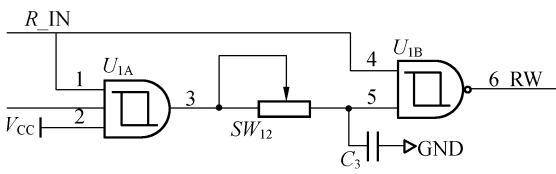


图 6 高速窄脉冲信号宽度调制

Fig. 6 Pulse width modulation of high frequency and narrow width signal

由于复位信号极窄,对其上升沿和下降沿要求极高。采用三极管如 9015 和常见高速运放如 AD849(摆率 300 V/ μ s)、AD811(摆率 2 500 V/ μ s)驱动及高速驱动芯片如 EL7156(最高工作频率可达 40 MHz)正压驱动后经交流耦合、箝位输出都难以满足要求;采用 T_1 的超高速运放 THS3061(摆率 7 000 V/ μ s)反相放大可满足要求,如图 7 所示。

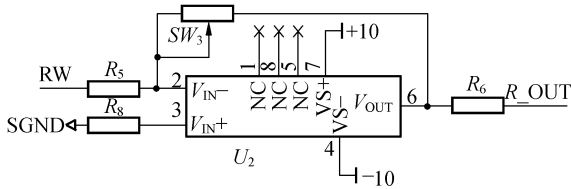


图 7 高速窄脉冲信号的驱动方式

Fig. 7 Driving way of high frequency and narrow width signal

3.3.4 电子快门的实现

KAI-1010M 为防止高光溢出提供一种结构,可实现溢出保护和曝光时间可调节功能。溢出保护功能通过加在器件衬底的直流电压来实现,若足够大的电压脉冲(峰值约 40 V)加到衬底,所有光电二极管内电荷被抽空,随后开始光积分阶段,实现电子快门功能。为此要求加到衬底上的直流电压为 7~15 V,在电子快门期间衬底上的电压瞬间变为 40 V,在通常的 CCD 驱动电路上很难见到如此高的电压。

如图 8 所示,在静态时,SHUTTER_IN 输入为高电平,偏置电路使 Q_3 (9014) 处于饱和状态,使 Q_2 (9015) 处于截至状态,两只三极管的公共集电极处电压约为 -20 V,输出端直流电压为 +15 V 经 R_{22} 与 R_{17} 的分压;当 SHUTTER_IN 出现负跳变时, Q_3 迅速截止, Q_2 迅速导通,公共集电极处电压迅速由 -20 V 上升至 +20 V,在输

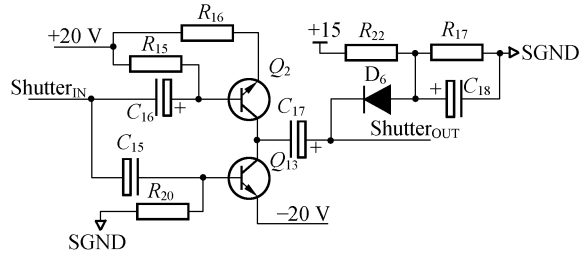


图 8 底层电压的驱动方式

Fig. 8 Driving way of substrate voltage

出端便可产生出峰值约 40 V 的电子快门脉冲,可通过适当降低正负端电源电压使输出信号的最高值为 40 V。

3.3.5 电磁兼容性的实现

针对系统中有多种频率信号(最低为 15 Hz,最高为 40 MHz),且电平值相差较大(最低为 -9 V,最高为 +40 V)这一难点,本文提出以下解决方法:将模拟和数字部分电路分开;采用电源 π 型滤波;对高频敏感信号包地;通过增加低频信号的上升沿、下降沿时间来减少其对周围的电磁辐射;在各电路板采用板间连接器连接缩短连线;在各信号间加地线隔离。同时在原理图和 PCB 设计阶段使用 Cadence 软件对其进行仿真,保证信号的完整性和电磁兼容性。

3.4 实验结果及部分实测波形

调试中,水平转移时钟为 10 MHz,复位脉冲宽度在 8~25 ns 内,采用两路数据同时输出。采用示波器 DL9710L(采样率 5 GHz,带宽 1 GHz)进行测试,经测试各驱动信号的高、低电平均在正常工作电压范围内,垂直转移信号 V_1 、 V_2 和 FDG 的上升沿、下降沿时间在 0.2~0.4 μ s 之间,电子快门的上升沿、下降沿时间在 3~5 μ s 之间,水平转移信号 H_{1A} 、 H_{1B} 和 H_2 的上升沿、下降沿在

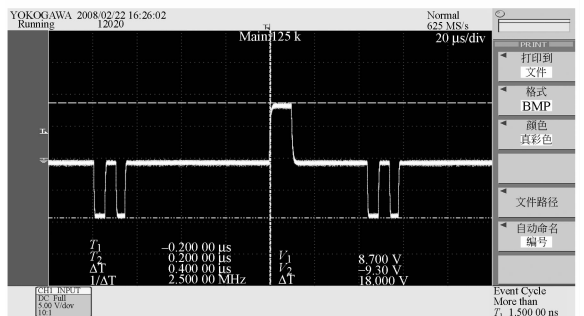


图 9 三电平信号实测波形

Fig. 9 Real waveform of the three-state signal

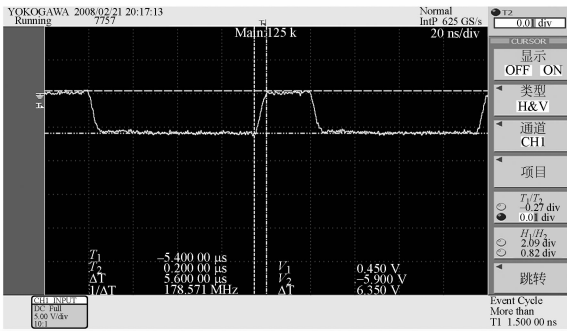


图 10 复位信号实测波形

Fig. 10 Real waveform of reset signal

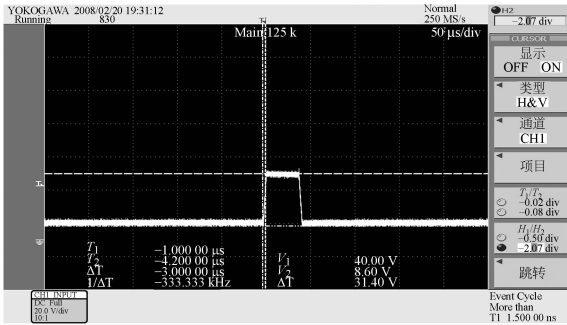


图 11 电子快门信号实测波形

Fig. 11 Real waveform of electronic shutter signal

12~14 ns 之间,复位脉冲的上升沿、下降沿时间为 5.6 ns。部分实测波形即三电平、复位和电子快门信号如图 9、10 和 11 所示。

4 结 论

该 CCD 驱动系统采用低成本器件设计,具有性能好,设计灵活,成本低的特点。实验证明,该 CCD 驱动系统能够同时输出两路 CCD 电压信号,数据输出速率达 15 frame/s,能够满足空间测绘相机系统的设计要求,设计中的一些新方法可作为以后 CCD 驱动设计的参考。负压下的高速驱动是 CCD 驱动系统的一个难题,若进一步改进 PCB 布局和布线,采用 TI 超高速运放 THS3201(摆率为 10 500 V/μs)驱动水平转移信号,水平转移时钟可达到 20 MHz,数据输出速率可达 27 frame/s。

参考文献:

- [1] 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.
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1191-1195. (in Chinese)
- [2] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程,2006,14(4):709-713.
YAN F, YU Z J, YU X, et al.. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):709-713. (in Chinese)
- [3] 李哲,贾欣志. X 射线敏感 ICCD 图像传感器研究[J]. 光学精密工程,2005,13(6):754-758.
LI ZH, JIA X ZH. Research on X-ray sensitive ICCD image sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):754-758. (in Chinese)
- [4] JON A H, CHRISTOPHER J B, CASERTAN S, et al.. The photometric performance and calibration of WFPC2 [C]. *Identifiers Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1995,107:1065.
- [5] ROBERTO M, STIAVELLI M, O'CONNELL, R W, et al.. Selection of the infrared detectors for wide field camera 3 on the hubble space telescope[C]. *Focal Plane Arrays for Space Telescope*, SPIE, 2004,5167:166-174.
- [6] 盛翠霞,张涛,纪晶,等. 高分辨率 CCD 芯片 FTF4052M 的驱动系统设计[J]. 光学精密工程,2007,15(4):564-569.
SHENG C X, ZHANG T, JI J, et al.. Design of CCD FTF4052M driver system with high sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):564-569. (in Chinese)
- [7] KODAK DEVICE PERFORMANCE SPECIFICATION Revision MTD/PS-0502, October 17, 2006[Z].
- [8] MCCURNIN T W. Signal processing for low level, high precision CCD imaging[J]. *SPIE*, 1991,1448:225-235.
- [9] DOTY J P, LUPPING G A, RICHER G R. Design of low noise, high performance X-ray charge-coupled device cam-

era[J]. *Opt. Eng.*, 1987, 26: 829-836.

- [10] 陈学飞, 汶德胜, 郑培云. 基于 CPLD 的面阵 CCD 驱动时序发生器设计及其硬件实现[J]. *光子学报*, 2007, 36(增): 282-285.
CHEN X F, WEN D SH, ZHENG P Y. Design on driving schedule generator for array CCD and hardware based on CPLD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(Supp.): 282-285. (in Chinese)
- [11] CENTEN P. CCD-on-chip amplifiers; noise performance versus MOS transistor dimension[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 38(5): 1205-1206.
- [12] KODAK USERS MANUAL Revision 1.0 MTD/PS-0867, February 9, 2006[Z].
- [13] 稻叶保. 模拟技术应用技巧 101 例[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
DAO Y B. *Analog Gijyutsu Sense UP* 101 [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)

作者简介: 刘金国(1968—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事 CCD 图像传感器应用技术的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

通讯作者: 余 达(1980—), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CCD 图像传感器应用技术。E-mail: yuda83@tom.com

● 下期预告

基于光纤的三维电子散斑干涉测量系统设计

周文静^{1,2}, 于瀛洁¹

(1. 上海大学 精密机械工程系, 上海 200072; 2. 广东海洋大学 自动化系, 广东 湛江 524088)

为了实现物体三维变形非接触式测量, 设计了基于电子散斑干涉技术的三维变形测量系统。该系统中采用了一分五型分束光纤, 这根光纤在系统中起到分光和传光的作用, 使系统所需器件相比一般的设计系统要少。为了获得变形的量化数值, 系统将电子散斑技术与相移技术结合在一起, 由压电陶瓷引入相移, 并采用“4+1”相移算法计算变形量。该系统可以实现面内及离面变形的独立测量, 进而实现物体三维变形的测量。文中首先以带缺陷的木板为对象进行了加热变形测量, 检测其面内、离面变形的敏感度。继以钢板为测试对象, 进行了应力三维变形的测量, 得其离面变形量为 $5 \mu\text{m}$ 。结果表明设计系统可以实现各种变形的测量。