

文章编号 1004-924X(2014)02-0467-07

# 全帧 CCD 相机时间延迟积分模式下的图像缺损

冷 雪<sup>1,2\*</sup>, 张雪菲<sup>1</sup>, 李文明<sup>1,2</sup>, 孙翠羽<sup>3,4</sup>, 陈浠惠<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 4. 国家测绘局海岛(礁)测量重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**长焦距面阵 CCD 相机以 TDI 模式进行动态横向多幅扫描成像时, 行转移频率高或者曝光时间长会使图像输出有明显缺损, 从而影响图像的判读。为解决这一问题, 分析了全帧 CCD 相机 TDI 模式的工作原理, 分析认为快门曝光过程中 CCD 存在的无效 TDI 转移是导致输出图像出现缺损的主要原因。通过实验验证了分析结果, 并提出保证 CCD 曝光过程中 TDI 转移与机械快门曝光精确同步的方法来消除无效 TDI 转移。据此设计了光电同步定位法进行曝光控制, 并研制了相应的快门光电同步装置。成像实验结果显示, 该方法可将图像缺陷区域控制在 15 列像元内, 解决了面阵 CCD 在 TDI 模式下输出图像的缺损问题, 提高了图像判读精度。

**关键词:** CCD 相机; 全帧转移 CCD; 面阵 TDI 级数; 行转移频率; 图像缺损

**中图分类号:** V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0467

## Image defect of full-frame CCD in TDI mode

LENG Xue<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xue-fei<sup>1</sup>, LI Wen-ming<sup>1,2</sup>, SUN Cui-yu<sup>3,4</sup>, CHEN Xi-hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *School of civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;*

4. *Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, State Bureau of Surveying and Mapping, Qingdao 266590, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: kramer@126.com*

**Abstract:** When a long focal area-array CCD camera takes photos in a TDI mode for dynamic lateral multi-frame imaging, it will output images with large size defect on the edge of image because of the high line transfer frequency or long exposure time and will influence image interpretation. To overcome the problems, the operating principle of area-array CCD in the TDI mode was analyzed, and the analysis indicates that the large size defect in the image comes from the invalid TDI transfer stages of the CCD during shutter exposure process. The obtained results were verified by a experiment and a method that the TDI transfer was finished simultaneously with shutter exposure was proposed to remove the invalid TDI transfer. On the basis of the analysis, a photo-electricity positioning synchro-

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-11.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA7010102)

nized was proposed and a photo-electricity synchronizer was developed to settle the headache. The results show that the image defect area is less than 15 column-pixels, which successfully solves the image defect from the area-array CCD camera in the TDI mode and improves its image interpretation accuracy.

**Key words:** CCD camera; full-framer transfer CCD; area-array CCD TDI stage; line transfer frequency; image defect

## 1 引言

随着国外 CCD 制造技术的发展,带有时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)功能的全帧转移面阵电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)<sup>[1-4]</sup>因既具有面阵的优点,如成像时曝光时间短,受载机的姿态影响小,图像保真度高,同时还具有线阵 TDI-CCD<sup>[5-7]</sup>的像移补偿功能,已逐渐开始取代线阵 CCD,被越来越多地应用在航空成像领域。这种 CCD 可将线阵 TDI-CCD 摆扫成像的优点与面阵 CCD 分幅步进成像的优点相结合,实现动态横向多幅扫描成像,从而可以在大速高比的条件下实现宽收容度。国外面阵长焦距 TDI-CCD 相机以 ROI 公司的双波段 CA-295<sup>[8]</sup>相机为代表。其可见光像元数为  $5\ 000 \times 5\ 000$ ,它利用 TDI 对摆扫方向的像移进行补偿。国内现阶段航空领域还是以线阵 TDI-CCD 相机为主。

本课题组首次采用动态横向多幅扫描成像技术,利用面阵 CCD 的 TDI 功能进行摆扫方向像移补偿,以实现宽收容度。实际成像中,每次成像结束时,图像上曝光结束的位置都会有黑色未曝光区域,这些黑色未曝光区域会影响成像图像判读,其大小随着曝光时间或扫描成像速度的不同而不同。通过测量黑色区域的像元数,以及图像的曝光时间和摆扫速度,发现黑色区域是 TDI 的转移结束时间与快门实际曝光结束时间不同步所导致的,并通过实验验证了这一结论。图像缺损是全帧 CCD 在 TDI 模式下成像存在的普遍问题,只是由于曝光时间和行转移频率不同,缺损大小对图像判读的影响程度不同。而利用 CCD 控制 TDI 转移电信号与机械结构快门<sup>[9-10]</sup>同步动作是一个技术难题。为了解决这一问题,本文设计了光电同步定位法进行曝光控制。

## 2 曝光过程及图像缺损

### 2.1 快门曝光过程

本项目使用全帧面阵 CCD 作为成像元件,其像元数为  $4\ 008(H) \times 5\ 344(V)$ ;像元尺寸为  $9\ \mu\text{m}$ ,可以配置为面阵或 TDI 扫描两种成像模式。该全帧面阵 CCD 与焦平面帘缝式机械快门配合来成像。快门帘缝宽度固定,通过改变帘速可以改变曝光时间。为了增加覆盖宽度,相机设计为动态横向多幅扫描成像方式,并利用相机 TDI 模式进行摆扫方向的像移补偿。图 1 为快门曝光示意图。

CCD 通过快门帘缝扫过像面来成像,帘缝的运动方向与 TDI 转移方向相同,帘缝速度决定了曝光时间。由摄影脉冲信号驱动焦平面快门产生幅面信号来完成相机拍照。TDI 转移由快门幅面信号控制。曝光开始,产生幅面信号,TDI 开始转移;曝光结束,幅面信号也结束,TDI 转移结束。这样,一次完整的曝光过程完成。

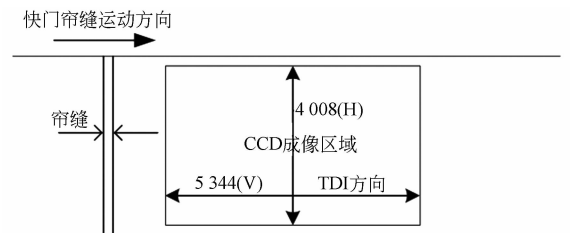


图 1 快门曝光示意图

Fig. 1 Schematic of shutter exposure

### 2.2 图像缺损

在实际对外成像时发现,每次 TDI 扫描成像后,图像都会出现未曝光的黑色区域,黑色区域的大小随着曝光时间和扫描速度不同而变化,并且黑色区域都出现在快门曝光结束位置。图 2 和图 3 为扫描速度  $\omega = 8.96(^{\circ})/s$ ,曝光时间分别为  $1/100\ \text{s}$  和  $1/200\ \text{s}$  时的图像;图 4 为扫描速度

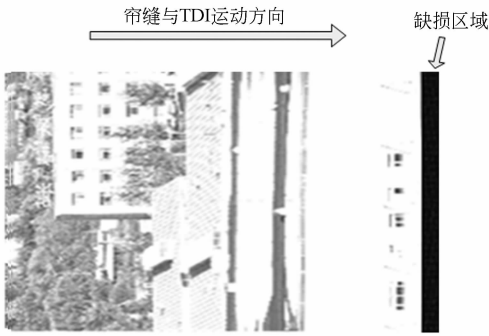


图 2 曝光时间为 1/100 s,扫描速度为 8.96(°)/s 的图像  
Fig. 2 Image with exposure time of 1/100 s and scan velocity of 8.96(°)/s

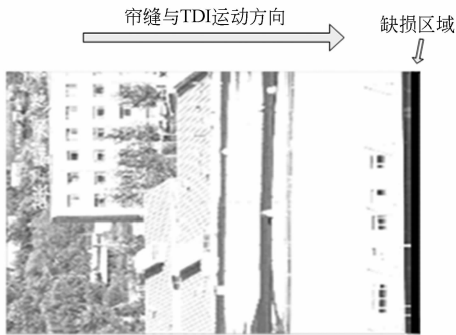


图 3 曝光时间为 1/200 s,扫描速度为 8.96(°)/s 的图像  
Fig. 3 Image with exposure time of 1/200 s and scan velocity of 8.96(°)/s

$\omega=6.8(^{\circ})/s$ ,曝光时间为 1/100 s 的图像。可以明显发现,在图像曝光结束区域有未曝光黑色区域。

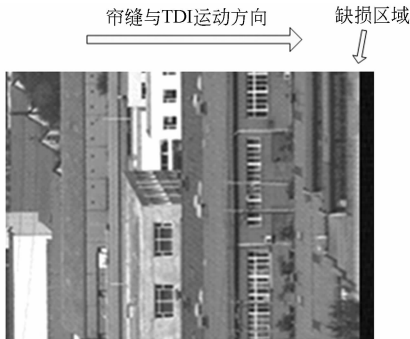


图 4 曝光时间为 1/100 s,扫描速度为 6.8(°)/s 的图像  
Fig. 4 Image with exposure time of 1/100 s,scan velocity of 6.8(°)/s

### 3 原因分析与实验验证

#### 3.1 原因分析

通过分析整个成像过程来寻找图像缺损的原

因。由上文可知,CCD 曝光和 TDI 转移由快门幅面信号控制。快门曝光开始,凸轮压住微动开关产生幅面信号,以控制 TDI 开始转移。当帘缝扫过 CCD 像面后,凸轮释放微动开关,幅面信号结束,使得 CCD 曝光和 TDI 转移结束。在结构上,通过控制凸轮行程和微动开关位置,可以保证幅面信号宽度完全覆盖 CCD 像面位置。快门动作时序如图 5 所示。

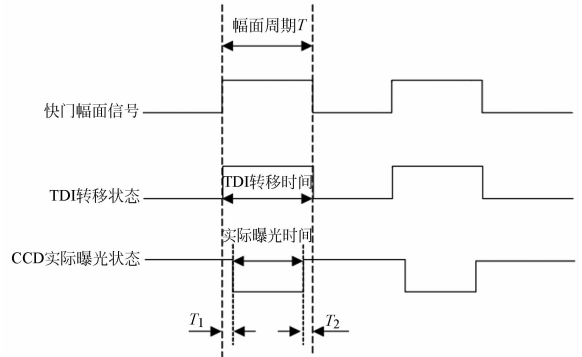


图 5 CCD 控制时序图

Fig. 5 CCD control sequence chart

图 5 中, $T_1$  表示 TDI 开始转移比实际曝光开始提前的时间。 $T_2$  表示 TDI 结束比曝光结束延迟的时间。通过对实际成像的分析发现,图像缺损区域大小与曝光时间有关系,随着曝光时间的增加,图像缺损区域也增大,如图 3 和图 4 所示。同时,在相同的曝光时间下,减小相机的扫描速度,即减小 CCD 输出行转移频率,图像缺损区域也会随之减小。由于 TDI 转移级数也与曝光时间和扫描速度都有关系,因此,推测图像缺损与 TDI 转移有关。

#### 3.2 全帧转移面阵 CCD 的 TDI 转移原理

为了查找原因,文中分析了面阵 CCD 的 TDI 转移过程。面阵 CCD 可以看作线阵 CCD 的二维阵列模式,线阵 CCD 的 TDI 原理如图 6 所示。由图 8 可知,在沿着 CCD 列方向的推扫成像过程中,在第一个积分周期  $T_1$  内,目标在某列的第一个像元进行曝光,得到的光生电荷并不像普通 CCD 一样读出,而是下移一个像元。在第二个积分周期  $T_2$  目标恰好移动到该列的第二个像元进行曝光,得到的光生电荷与上一个像元移来的电荷相加再移到下一个像元,直到第  $n$  个积分周期时,目标已移到该列的第  $n$  个像元进行曝光,然后

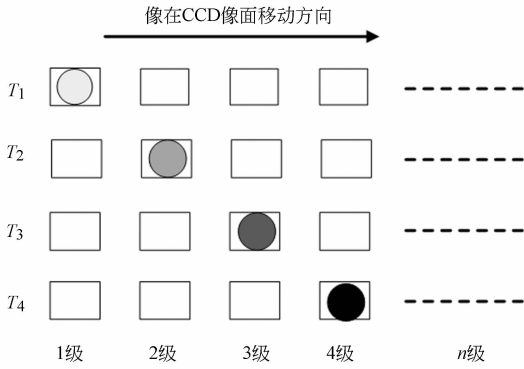


图 6 线阵 CCD 的 TDI 转移原理

Fig. 6 Principle of TDI transfer for linear array CCD

转移到串行寄存器输出图像,也就是图像被成像阵列曝光了  $n$  次才输出。因此, $n$  级 TDI CCD 的曝光时间是单级 CCD 的  $n$  倍,这就是 TDI 功能的最大优势。

面阵 CCD 相机由快门控制曝光时间,相对于线阵 CCD 的 TDI 级数,全帧面阵 CCD 的 TDI 转移级数推导如下:

$$N = \tau \cdot F_{\text{line}}, \quad (1)$$

$$F_{\text{line}} = \frac{v}{b}, \quad (2)$$

$$v = \frac{\pi}{180} \omega \cdot f, \quad (3)$$

其中: $N$  为面阵 TDI 转移级数; $\tau$  为曝光时间; $F_{\text{line}}$  为 TDI 行转移信号频率; $v$  为像面产生的扫描像移速度; $b$  为像元尺寸; $\omega$  为扫描速度; $f$  为相机焦距。

对于焦距为 1 000 mm 的面阵 CCD 航空相机,设其曝光时间为  $1/100 \sim 1/1\,000$  s,并且连续可调;像元尺寸为  $9 \mu\text{m}$ ;扫描头扫描速度  $\omega = 8.96(^{\circ})/\text{s}$ ;计算如下: $\tau = 1/100$  s 时, $N = 174$  级; $\tau = 1/500$  s 时, $N = 35$  级; $\tau = 1/1\,000$  s 时, $N = 17$  级;

以上称为面阵 CCD 的有效 TDI 转移级数。理论上,面阵 CCD 的 TDI 有效转移级数可以达到 CCD 最大列数像元数。

由于机械快门的存在,除了有效级数,面阵 CCD 还会产生无效 TDI 转移级数。CCD 列像元在整个幅面信号阶段都在转移,由前面分析可知,在  $T_2$  时间段内,快门在曝光结束后开始遮挡 CCD 像面,而这时幅面信号还没有结束,因此,这时产生的 TDI 转移级数是无光条件下的 TDI 转移,称为无效 TDI 级数。由于快门已经遮挡像

面,而此时 TDI 还继续转移,直至积分周期结束。因此,会有  $n$  列黑色图像输出,这与实际成像情况相符,幅面信号产生如图 7 所示。

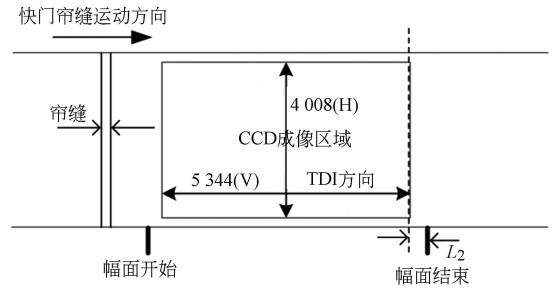


图 7 幅面信号产生示意图

Fig. 7 Chart of format-signal generation

正是因为无效级数的出现,才导致 CCD 曝光时图像输出有黑边。遮挡区域列像元的大小可由下式计算:

$$N' = v \cdot T_2, \quad (4)$$

$$v = \frac{\pi}{180} \omega \cdot f = F_{\text{line}} \cdot b, \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{V} = L_2 \times \frac{\tau}{W_2}, \quad (6)$$

$$N' = \frac{\pi}{180} \omega \cdot f \cdot L_2 \times \frac{\tau}{W_2} = \frac{\pi \cdot L_2 \cdot f \cdot \tau \cdot \omega}{180 \cdot W_2} = \frac{L_2 \cdot b \cdot \tau \cdot F_{\text{line}}}{W_2}, \quad (7)$$

其中: $N'$  为缺损区域列像元的大小, $T_2$  为无效转移时间; $W_2$  为帘缝宽度; $L_2$  为幅面信号实际结束位置与 CCD 曝光结束位置距离差。

快门装调好后, $L_2$  与  $W_2$  为固定值, $L_2$  的存在是不可避免的,这就无法保证帘缝扫过 CCD 像面的物理结束位置与驱动 TDI 转移的幅面信号的结束位置完全一致。这与实际拍照时的图像缺损现象一致,因此,只有减小  $L_2$  才能消除图像缺损现象。

### 3.3 实验结果验证

$L_2$  值很难精确测量,快门安装一旦固定, $L_2$  与  $W_2$  即为固定值。为了进一步验证上述推论,在镜头前进行了积分球成像实验。增加行转移频率,使其达到 40 kHz,曝光时间固定在  $1/100$  s,实际成像如图 8 所示。

缺损区域占图像面积的 12% 左右,约有 640 列未曝光像元。行转移频率设为 10 kHz,曝光时间固定在  $1/100$  s,实际成像如图 9 所示。

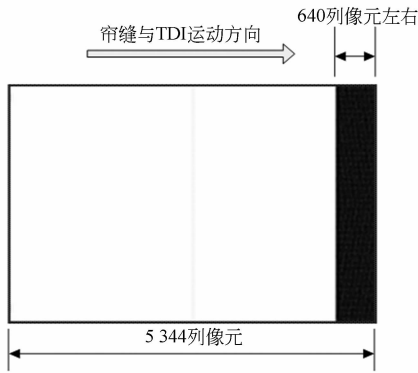


图 8 曝光时间为 1/100 s,行频为 40 kHz 的积分球成像图  
Fig. 8 Integrating sphere imaging with exposure time of 1/100 s and line transfer frequency of 40 kHz

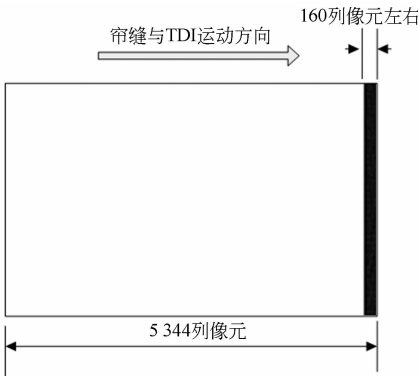


图 9 曝光时间为 1/100 s,行频为 10 kHz 的积分球成像图  
Fig. 9 Integrating sphere imaging with exposure time of 1/100 s and line transfer frequency of 10 kHz

缺损区域占图像面积的 3% 左右,约 160 列未曝光像元。行转移频率设为 10 kHz,曝光时间

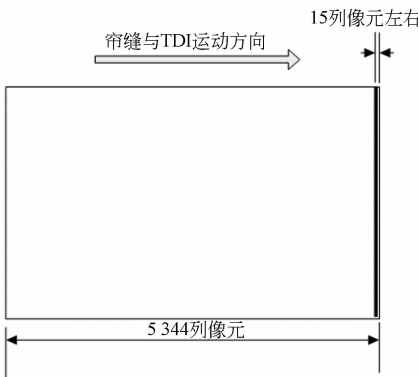


图 10 曝光时间为 1/100 s,行频为 10 kHz 的积分球成像图  
Fig. 10 Integrating sphere imaging with exposure time of 1/100 s and line transfer frequency of 10 kHz

固定为 1/1 000 s,实际成像如图 10 所示。

由图 10 可知,缺损区域占图像面积的 0.3% 左右,约有 15 列未曝光像元。图像缺损公式中行频与曝光时间对图像缺损的影响关系一致。因此,只有消除无效 TDI 的转移,即保证控制 TDI 转移的幅面信号的结束位置与 CCD 实际曝光结束位置一致,才能根本解决图像缺损问题。

#### 4 光电同步法设计与实验

为了保证快门物理曝光结束位置与幅面信号结束位置一致,也就是在帘缝扫过 CCD 像面时控制幅面信号结束,需要在 CCD 实际曝光结束位置加装位置传感器,通过传感器的信号来控制幅面信号结束。所使用的传感器要具有尺寸小、重复定位精度高、响应时间短等特点。文中利用快门帘缝的通光特点,选用高精度的光电开关来完成定位要求。原理示意图如图 11 所示。

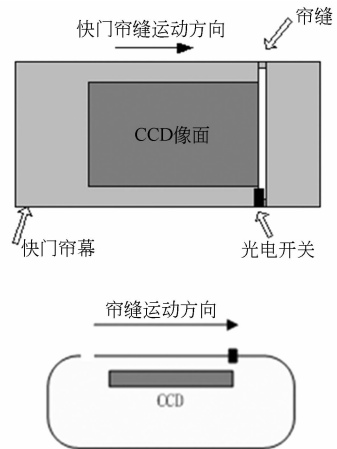


图 11 快门光电同步俯视图与剖面示意图  
Fig. 11 Top view and cross-section view of photoelectric synchronous of shutter

利用快门帘缝通光的性质,将 U 型槽结构的对射式光电开关安装在 CCD 曝光结束的边界上。每次帘缝扫过 CCD 结束位置边界时,即传感器位置,传感器就会产生一个脉冲信号。再通过 CPU 采集这个脉冲信号来控制幅面信号。安装时要保证光电开关与 CCD 边界的相对位置固定准确,安装精度要控制在 ±0.3 mm 以内。经过积分球实验验证,在曝光时间最长,即 1/100 s,最大实际应用行频为 20 kHz 条件下,10 次实验测得的缺损像元列的数据如表 1 所示。

表 1 曝光时间为 1/100 s,行频为 20 kHz 时的图像缺损记录

Tab. 1 Experiment records with exposure time of 1/100 s and line transfer frequency of 20 kHz

测量次数	缺损像元列数	测量次数	缺损像元列数
1	<13	6	<12
2	<12	7	<13
3	<11	8	<10
4	<13	9	<9
5	<13	10	<12



图 12 加装光电同步装置后对外成像图

Fig. 12 Practical imaging with shutter photoelectric synchronous device

## 参考文献:

- [1] 曲洪丰,王晓东,吕宝林.多通道输出面阵 CCD 图像非均匀性校正[J]. 液晶与显示,2012,27(4): 569-572.  
QU H F, WANG X D, LV B L. Non-uniformity correction of multiple output area CCD image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(4): 569-572. (in Chinese)
- [2] 刘妍妍,李国宁,张瑜,等.可见光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 液晶与显示,2010,25(5): 759-763.  
LIU Y Y, LI G N, ZHANG Y, et al.. Detection and correction of response non-uniformity based on visible light area CCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010,25(5): 759-763. (in Chinese)
- [3] 张传胜.基于 FPGA 的面阵 CCD 驱动及快速显示系统的设计实现[J]. 液晶与显示,2012,27(6): 789-794.  
ZHANG CH SH. Design of driving circuit for area array CCD based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(6): 789-

测得结果显示缺损像元均小于 15 列。

当曝光时间为 1/200 s,行频为 17 kHz 时,对外实际成像如图 12 所示。由图 12 可见,图像缺损区域肉眼已经很难分辨出来,不再影响图像的判读。

## 5 结 论

本文通过对全帧 CCD 图像缺损现象的研究,分析了面阵 CCD 相机 TDI 转移过程中有效 TDI 和无效 TDI 转移产生的原因,通过实验验证了无效 TDI 转移是图像缺损的原因,并提出了光电同步法来解决这一问题。实验和对外成像表明:该方法可以将图像缺损区域列像元大小控制在 15 以内,成像完整。图像缺损是全帧 CCD 相机 TDI 转移时普遍存在的问题,对于图像缺损的研究和解决将有助于面阵 CCD 相机的应用,在实际工程中具有较高的实用价值。

794. (in Chinese)

- [4] 罗通顶,李斌康,郭明安,等.科学级 CCD 远程图像采集系统[J]. 光学 精密工程,2013,21(2): 496-502.  
LUO T D, LI B K, GUO M A, et al.. Remote image acquisition system with scientific grade CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(2): 496-502. (in Chinese)
- [5] 薛旭成,韩诚山,薛栋林,等.应用双排 TDI CCD 提高空间推扫遥感相机动态范围[J]. 光学 精密工程,2012,20(12):2791-2795.  
XUE X CH, HAN CH SH, XUE D L, et al.. Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(12):2791-2795. (in Chinese)
- [6] 刘辉,司国良,郭永飞.外同步式时间延迟积分 CCD 传感器模拟装置[J]. 光学 精密工程,2012,20(5): 1110-1116.  
LIU H, SI G L, GUO Y F. TDI CCD simulation instrument synchronized with clocking signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(5): 1110-1116. (in Chinese)

- [7] 张雪菲,丁亚林,李昕阳,等. 全景式航空相机的离散滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(9): 1163-1168.  
ZHANG X F, DING Y L, LI X Y, *et al.*. Discrete-time sliding-mode control in panoramic aerial camera [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(9): 1163-1168. (in Chinese)
- [8] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation[J]. *SPIE*, 1993, 2023: 65-79.
- [9] 冷雪,张洪文,刘明,等. 高频正交大面阵焦平面快门设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2630-2635.  
LENG X, ZHANG H W, LIU M, *et al.*. Design of large format focal-plane shutter with high frame-frequency and orthogonality [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2630-2635. (in Chinese)
- [10] 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.  
ZHANG L, DING Y L, ZHANG H W. New single curtain type shutter used on aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1815-1820. (in Chinese)

#### 作者简介:



冷雪(1976—),男,吉林长春人,副研究员,硕士,1999年于大连海事大学获得学士学位,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事航空成像系统电子学设计方面的研究。E-mail: kramer@126.com



张雪菲(1982—),女,吉林长春人,助理研究员,博士,2005年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事现代数字控制技术的研究。E-mail: dashafei@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)