

监视 CCD 相机可靠性主要影响因子的自动测试技术

常 飞 刘 金 谢兴全 张学东 周 竞 魏仲平

(中国工程物理研究院计算机应用研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在神光Ⅲ装置中使用了超过两百个监视 CCD 相机,需要对每一个监视 CCD 相机进行严格的测试以保证其具有高可靠性。为提高测试效率与速度,根据应用环境的特点,针对影响监视 CCD 可靠性的主要影响因子提出了可行的测试方法,并提出了自动测试模型,包括可靠性综合评价函数与自动测试流程。实验室测试结果表明,针对不同影响因子提出的测试方法以及自动测试模型能够有效地对监视 CCD 相机的可靠性进行综合评测,同时提高了测试速度与效率。

关键词 光学器件;可靠性评测;自动测试流程;监视 CCD 相机

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s208008

Auto-Testing Technology for Main Factors of Reliability of Monitoring CCD Camera

Chang Fei Liu Jin Xie Xingquan Zhang Xuedong Zhou Jing Guo Zhongping

(Computer Application Institute, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to improve test efficiency and to evaluate reliability of monitoring CCD which is composed of CCD Camera and baffle that is customized as specified requirements, some appropriate testing method for main factors involved in reliability of monitoring CCD is proposed, as well as auto-testing model including comprehensive evaluation function and auto-testing flow. More than two hundreds of monitoring CCD are used in Shenguang-III (SG-III) system now, to ensure high reliability of the whole system, every monitoring CCD should be tested carefully. The experimental results show that the proposed testing methods for main factors and auto-testing model are adequate to evaluate the reliability of monitoring CCD, and the average time of auto-testing is shortened evidently on comparison to that of manual testing method.

Key words optical devices; reliability evaluation; auto-testing flow; monitoring CCD camera

OCIS codes 040.1520; 120.4800; 110.2970

1 引 言

随着 CCD 相机技术的成熟,CCD 相机越来越广泛地应用于科学研究、国防军事和航空航天领域^[1~3]。在大型惯性约束聚变试验装置中,如中国的神光Ⅲ装置,美国国家点火装置(NIF)等,都使用大量的科学级 CCD 和普通 CCD 相机进行光路准直、能量检测和图像采集等。在神光Ⅲ装置^[4]光路自动准直系统中^[5],使用了一种监视 CCD 相机,由 CCD 相机和定制的挡板组成,用于监视光路自动准直过程,在准直结束以及正式的能量试验中,通过挡板进行自我保护以免被实验中的高能激光损坏。监

视 CCD 相机安装在真空箱内,由于真空箱内空间有限,不能采用元器件冗余机制^[6]保证装置的可靠性,因此只有通过严格测试保证单个监视 CCD 相机可靠性来保证整个装置的可靠性。当前对 CCD 的测试研究主要集中在 CCD 相机的性能测试,如在尚媛园等^[7]提出了增益、读出噪声、电荷转移效率以及满阱电荷等性能参数的测试方法;程书博等^[8]研究了暗电流特性以及快门响应时间特性测试方法;在文献^[9]中提出了对非线性度的测试方法。对于 CCD 相机的可靠性研究及测试,需要从具体的应用和需求出发,当前对可靠性的测试研究较少。本文以神

收稿日期: 2012-07-03; 收到修改稿日期: 2012-08-15

作者简介: 常 飞(1985—),男,助理工程师,主要从事控制系统集成和光学设备测试等方面的研究。

E-mail: dongfangqiuqian@gmail.com

光Ⅲ装置的光路自动准直为应用背景,对监视 CCD 相机的可靠性主要因子进行分析,对具体的测试方法进行研究。在现有的装置中,需要使用近 200 个监视 CCD 相机,未来还需要使用约 800 个,研究和实现 CCD 相机可靠性自动测试,对提高测试效率,保证测试可信度以及保证整个装置的可靠性具有重要意义。

根据近年来在实际应用及测试中发现的问题,分析了监视 CCD 相机可靠性的 4 个主要影响因子,根据每一个影响因子的特点结合图像处理技术提出了相应的测试方法。分析了因子之间的相互关系,提出并实现了自动测试模型,使用 C++ 以及 Matlab 软件实现了自动测试程序,对某公司某型号的 6 个 CCD 相机及挡板进行了测评,验证了不同因子测试方法的可行性以及自动测试模型的高效性。

2 监视 CCD 相机

本文中监视 CCD 相机主要由两部分组成,一部分是带定焦镜头的面阵行间转移型 CCD 相机,计算机可以通过网络连接并控制 CCD 相机,另一部分是根据需要定制的安装在 CCD 相机上的小孔型保护挡板。在 CCD 相机镜头前方加装一个通过电磁铁驱动的保护板,通过外部的开关信号控制挡板的打开和关闭,保护板完全遮蔽通光孔时,则挡板完全关闭;反之,则表示挡板完全打开。只有挡板打开时,CCD 相机才能采集到图像,挡板关闭后,外部的激光不能射入,保护 CCD 相机芯片。挡板主要由保护

板和驱动模块组成。接收到打开和关闭信号后,驱动模块控制保护板的打开和关闭。监视 CCD 相机在黑暗的环境中使用,挡板的外面用 LED 灯照亮,如图 1 所示。

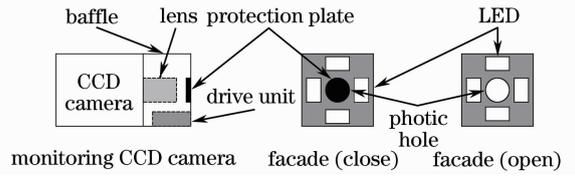


图 1 监视 CCD 相机示意图

Fig. 1 Schematic of monitoring CCD camera

3 关键影响因子测试技术

神光Ⅲ装置光路自动准直系统中使用的是面阵行间转移型 CCD,影响到 CCD 相机及其挡板可靠性有 4 个关键因素:1) 图像采集丢帧,2) 图像数据部分丢失,3) CCD 芯片损坏,4) 挡板可靠性。对于图像采集丢帧,测试比较简单,只需判断是否采集到图片即可。而对于图像数据部分丢失,表现为采集的图像中出现横向贯穿黑色条状带,如图 2(a)所示。当 CCD 芯片被局部损坏时,采集的图像中会出现贯穿整张图片的白色竖带^[10~12],如图 2(b)所示,极端情况下,采集的整幅图像全部为白色。对于挡板的稳定性测试,需要利用 CCD 采集的图像判断挡板是完全打开,完全关闭还是挡板不完全打开和关闭状态。因此,后 3 个因子需要根据实际情况采用不同的测试方法。

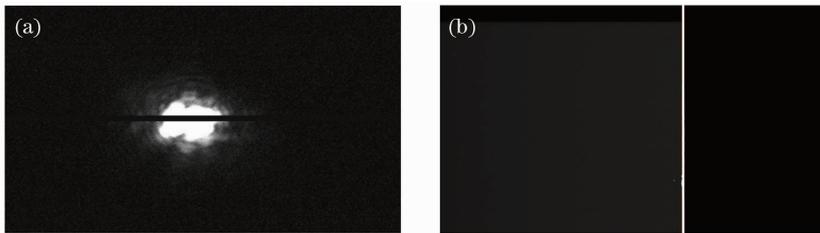


图 2 (a)数据缺失和(b)芯片损坏时不可逆的白色竖带图片

Fig. 2 Images with (a) data lost and (b) irreversible bright line when CCD' chip is damaged

对监视 CCD 相机进行自动测评,需要考虑到 4 个因子间的相互影响,按照一定的顺序进行。同时,在测试前以及每个因子测试前,需要一些预处理以保证整个测试流程顺利进行,测试前的预处理主要有 CCD 相机连接与软触发和外触发模式下 CCD 图像采集。4 个关键因子的自动测试流程如图 3 所示。

3.1 图像数据部分丢失检测

图像采集出现局部数据丢失时,在图片中会出

现贯穿图像的横向黑色条状带。图像中黑色条纹带可能是 CCD 采集图像时受自身或者外部信号的干扰引起,也可能由于 CCD 相机自身的设计缺陷造成,使图像中的部分数据丢失而用黑色填充。根据数据丢失图像的特点,采用如下算法进行检测:

- 1) 确定图像中的光斑区域矩阵 $I_{w \times h}$, w 为图像宽, h 为图像高;
- 2) 对 $I_{w \times h}$ 根据阈值进行二值化处理,取阈值

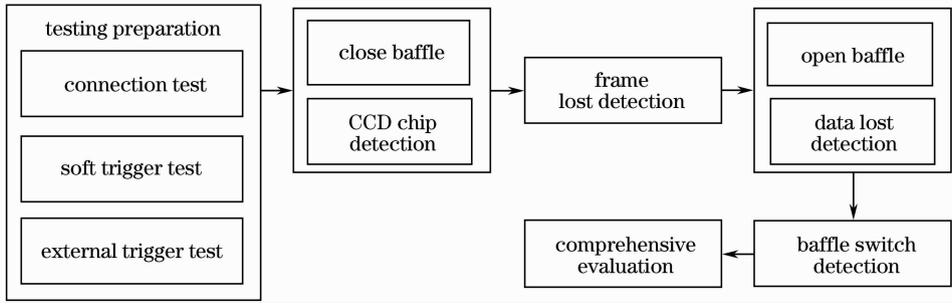


图 3 自动测试流程示意图

Fig. 3 Flow chart of automatic testing

V , 如果 $I(i, j) > V$, 则 $I(i, j) = 0$, 如果 $I(i, j) \leq V$, 则 $I(i, j) = 1$, 得到二值矩阵 $B_{w \times h}$;

3) 对 $B_{w \times h}$ 按行求和得向量 S_h ;

4) 求 S_h 中的最小值 m ;

5) 判定 m 是否等于 0, 如果 $m = 0$ 则表示有数据丢失。

3.2 CCD 芯片损坏检测

CCD 芯片损坏时, 在图像中出现贯穿整张图片的白色竖带。产生白色竖带的原因有两种, 一种是由饱和和串音^[13]造成, 也称为串扰或串扰效应^[14], 属于软损伤^[15]。其原理为: CCD 的光敏元为并行排列, 转移电荷的垂直位移寄存器是串行的, 各单元间用沟阻隔开, 基底相连, 强激光辐照时产生大量电荷在光信号积分时间沿着竖直时钟线方向溢出进入附近的势阱, 此外, 垂直位移寄存器中前一场的剩余电荷与后一场信号交叠, 从而导致饱和和串音产生白色竖带。因此, 停止强激光照射后, 通过一段时间恢复后采集的图片中不会再出现白色竖带。另一种是芯片损坏造成的, 属于永久性的硬损伤^[16], 无论有无激光照射, 采集的图像中白色竖带都会存在, 如图 2(b)所示。为避免饱和和串音对测试的干扰, 测试时需先关闭监视 CCD 相机的挡板再采集图像。根据白色竖带形成的原理, 结合图像扫描的思想, 提出了一种检测算法。算法的思想是, 选择图像中一定数量的行进行扫描, 记录每次行扫描最左和最右白色的像素点的列值, 然后用所有最右白色像素点的最左点的列值减去所有最左白色像素点的最右点的列值, 如果差值小于 0, 表示不存在白色竖亮线, 反之则存在。具体算法如下:

1) 对于图像矩阵 $I_{w \times h}$, 固定选取其中的第 1~3 以及 $h-3 \sim h$ 共 6 行像素点, 再在 $I_{w \times h}$ (行范围为 4~ $h-4$) 中随机选择 N 行像素点, 得到一个 $N+6$ 行的判定矩阵 $C_{w \times (N+6)}$;

2) 设置阈值 V , 从左向右扫描 $C_{w \times (N+6)}$ 的第 i

行, 当 $C(i, j) \geq V$ 时, 将 j 值添加到最左点列值集合 L 中, 即 $L = L \cup \{j\}$, 然后从右向左扫描, 当 $C(i, j) \geq V$ 时, 将 j 值添加到最右点列值集合 R 中, 即 $R = R \cup \{j\}$, 接下来安装相同的方法扫描 $C_{w \times (N+6)}$ 的第 $i+1$ 行;

3) 矩阵 $C_{w \times (N+6)}$ 扫描结束后, 如果 $L = \phi \wedge R = \phi$, 则芯片未损坏;

4) 如果 $L \neq \phi \wedge R \neq \phi$, 则找出 L 的最大值 a , R 的最小值 b ;

5) 如果 $b \geq a$, 则芯片损坏, 反之则芯片未损坏。

3.3 挡板开关状态检测

挡板的可靠性测试是向 CCD 挡板发送打开和关闭信号后, 挡板能够正常且稳定地打开或者关闭。在实际情况中, 挡板出现的问题主要有以下三种:

1) 向挡板发送打开或关闭信号后, 挡板不能打开或者关闭;

2) 向挡板发送打开或关闭信号后, 挡板不能完全打开或者完全关闭;

3) 向挡板发送打开信号, 挡板关闭; 向挡板发送关闭信号, 挡板打开。

挡板的不可靠性主要表现在连续进行 N 次打开和关闭操作中, 挡板有时能够打开, 有时不能打开, 有时部分打开或者关闭。测试挡板的可靠性, 首先需要检测挡板的打开或者关闭状态。由于挡板的打开或者关闭状态没有信号反馈, 测试挡板打开或者关闭需要借助 CCD 相机的图像采集, 向挡板发送打开或关闭信号后, CCD 相机采集图像, 通过图像判定挡板的开关状态。挡板主要有三种开关状态: 1) 完全打开, 2) 部分打开, 3) 完全关闭状态。在保护板遮蔽通光孔的面积分别为 5.1%, 10.5%, 14.7%, 15.6%, 52.8%, 72.18%, 91.2%, 95.2% 时, CCD 相机采集的图像分别如图 4(a)~(h)所示。

由图 4 可知, 当遮蔽面积为 95.2% 时, 采集的图像像素全部为黑色, 遮蔽面积为 5.1% 时, 对 CCD

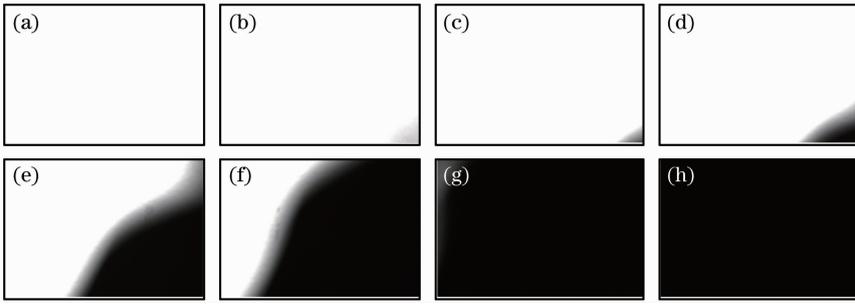


图 4 不同遮蔽面积采集的图像。(a) 5.1%;(b) 10.5%;(c) 14.7%;(d) 15.6%;(e) 52.8%;
(f) 72.18%;(g) 91.2%;(h) 95.2%

Fig. 4 Captured image with different covering areas. (a) 5.1%;(b) 10.5%;(c) 14.7%;(d) 15.6%;
(e) 52.8%;(f) 72.18%;(g) 91.2%;(h) 95.2%

图像的采集不造成影响。通过对采集图像进行检测,可能不能真正地判定挡板是否完全打开或者关闭,但是,这不影响通过图像判定挡板的打开和关闭,当遮蔽面积大于 95.2%时,已经完全遮蔽了外界的光线,对 CCD 芯片起到完全的保护作用。当遮蔽面积小于 5.1%时,对 CCD 图像的采集不构成任何影响,因此,可认为遮蔽面积大于 95.2%,挡板完全关闭,遮蔽面积小于 5.1%,挡板完全打开。对于挡板打开或关闭不完全的情况,可以通过计算图像像素的平均灰度值,然后跟挡板完全打开和完全关闭时采集的图像平均灰度值进行比较,但是该方法受环境的光照强度影响较大,而且在 CCD 芯片损坏的情况下,则该方法不能适用,此外还要求有完全打开和完全关闭时采集的图像做比较基准,需要人工进行干预。本文提出了另外一种判定方法,由图 4 可知,挡板不完全打开或关闭情况下,在图像的角部是黑色像素区域,并沿图像对角线方向另一个角部区域延伸,因此,可以通过判定图像的 4 个角部区域来判定挡板的开关状态。挡板的开关状态判定算法如下:

1) 向挡板发送打开或者关闭命令,然后采集图像得到像素矩阵 $I_{w \times h}$;

2) 对 $I_{w \times h}$ 根据阈值进行二值化处理,阈值为 V ,如果 $I(i, j) < V$,则 $I(i, j) = 0$,如果 $I(i, j) \geq V$,则 $I(i, j) = 1$,得到二值矩阵 $B_{w \times h}$;

3) 设定角区域选取比例系数 a ,在 $B_{w \times h}$ 中沿顺时针方向分别选取左上,右上,右下,左下 4 个角的区域得到 4 个角部区域像素矩阵 B_1, B_2, B_3, B_4 ,列数为 $c = a\omega$,行数为 $r = ah$,则 $B_1 = B(1:r, 1:c)$, $B_2 = B(1:r, \omega - c + 1:\omega)$, $B_3 = B(h - r + 1:h, 1:c)$, $B_4 = B(h - r + 1:h, \omega - c + 1:\omega)$;

4) 对矩阵 B_1, B_2, B_3, B_4 分别求和得 $S_1, S_2,$

S_3, S_4 ,然后计算 $S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$;

5) $b = S/4rc$,如果 $b = 1$ 则表示挡板是完全关闭状态,如果 $b = 0$,则表示挡板为完全打开状态,否则如果 $b < 1$ 且 $b > 0$,表示挡板是不完全开关状态。

4 自动测试模型

对监视 CCD 相机的自动测评,主要是针对 4 个关键影响因子进行测试,由于 CCD 芯片损坏具有不可逆性,因此不需要通过统计的方法进行测评,其他三个因子都需要经过重复多次,通过统计方式进行评价,因此需要测试图像采集丢帧率,图像数据部分丢失率以及挡板的正确响应率。

4.1 图像采集丢帧率测试

在自动准直过程中,CCD 相机需要在某一时刻采用外部触发方式抓取图像并处理,如果图像帧丢失,将会直接影响到准直流程的成功执行。因此,要求 CCD 相机的图像丢帧率尽可能低。对于图像丢帧测试,在外触发模式下,以随机时间间隔与等时间间隔 T_1 的方式分别采集 M_1, M_2 张图片,并分别记录图像丢帧数量 L_1, L_2 ,丢帧率 P_d 的计算式为

$$P_d = \frac{(L_1 + L_2)}{(M_1 + M_2)} \times 100\% \quad (1)$$

4.2 图像数据部分丢失率测试

图像数据部分丢失随机出现在软触发模式和外触发模式采集的图片中,因此,以随机时间间隔分别在软触发模式和外触发模式下采集 M_3, M_4 张图片,并分别记录丢失数据的图片数量 L_3, L_4 ,图像数据部分丢失率 P_l 为

$$P_l = \frac{(L_3 + L_4)}{(M_3 + M_4)} \times 100\% \quad (2)$$

4.3 挡板正确响应率测试

挡板的可靠性测试主要测试挡板能够正常响应开关信号的概率,以等时间间隔 T 向挡板交替发送

M 次打开和关闭信号,检测挡板的开关状态,记录挡板正确响应的次数 N ,即发送挡板打开信号挡板完全打开和发送挡板关闭信号挡板完全关闭的次数。挡板可靠性函数为

$$P_n = \frac{N}{M} \times 100\% \quad (3)$$

4.4 可靠性综合评价函数

CCD 及挡板的综合评价函数需要综合考虑在 4 个关键影响因子的影响,如果 CCD 芯片损坏,则整个 CCD 不能使用,可靠性为 0。芯片损坏的评价函数可表示为

$$P_c = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x=0$ 表示芯片损坏, $x=1$ 表示芯片完好。

对于其他三个因子,具有统计特性,采用系数加权的方式计算评价值,假定丢帧率的权值系数为 λ_1 ,数据丢失率权值系数为 λ_2 ,则挡板正确响应率权

值系数为 $(1-\lambda_1-\lambda_2)$ 。因此,整个 CCD 与挡板的可靠性综合评价函数为

$$F = P_c[\lambda_1 P_d + \lambda_2 P_1 + (1-\lambda_1-\lambda_2)P_n] \quad (5)$$

5 实验结果及分析

从某厂家的同一批某型号的带挡板的监视 CCD 相机中,随机选择 6 个进行手动和自动测试。手动测试主要由测试人员通过厂商提供的程序和接口手动操作采集图片,判定芯片是否损坏,记录图像丢帧数量,数据丢失图像的数量,手动控制挡板开关,观察并记录挡板正常响应的次数并计算。自动测试则是由 C++ 以及 Matlab 软件根据自动测试流程实现的程序进行。测试中, $T_1 = 1$ s, $M_1 = 2000$, $M_2 = 200$, $M_3 = 2000$, $M_4 = 200$, $T_2 = 2$, $M = 200$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.3$ 。手动测试结果如表 1 所示,自动测试结果如表 2 所示。

表 1 手动测试结果

Table 1 Result of manual test

CCD	$P_c/\%$	$P_d/\%$	$P_1/\%$	$P_n/\%$	$F/\%$	T/s
CCD1	1	0.227	0.136	91.5	96.49	2745
CCD2	1	0.182	0.181	97.5	98.89	2834
CCD3	1	0.364	0.227	98.5	99.22	2876
CCD4	1	0.273	0.091	96.5	98.49	2790
CCD5	1	0.318	0.136	95.5	97.66	2912
CCD6	0	—	—	—	0	10

表 2 自动测试结果

Table 2 Result of automatic test

CCD	$P_c/\%$	$P_d/\%$	$P_1/\%$	$P_n/\%$	$F/\%$	T/s
CCD1	1	0.273	0.182	92.5	96.86	1089
CCD2	1	0.227	0.227	96.5	98.46	1076
CCD3	1	0.409	0.272	97.5	98.79	1093
CCD4	1	0.273	0.136	92	96.68	1067
CCD5	1	0.318	0.182	95.5	98.05	1083
CCD6	0	—	—	—	0	5

由表 1 与表 2 可知,手动和自动方式都能完成芯片损坏判定,芯片损坏的 CCD 不进行后续其他因子的测试,综合评价值为 0。排除芯片损坏的 CCD 相机,其他 5 个 CCD 相机及其挡板在手动方式下平均综合评价值为 98.15,平均测试时间为 2831 s,自动方式下平均综合评价值为 97.77,平均测试时间为 1081 s。通过比较可知,自动方式下的综合评价值减少了 0.38,表示自动测试比手动方式测试能够更加有效地对 CCD 及其挡板进行测试;同时,手动方式测试所需时间是自动测试时间的 2.62 倍。因此,自动测试有效地提高了单个 CCD 及其挡板的测

试速度和效率。此外,自动测试可以并行执行,根据现有的自动测试程序,单台计算机具备同时测试 16 个 CCD 相机的能力,从而使测试效率得到更大的提升。

6 结 论

根据实际应用的需要,对影响 CCD 及挡板的稳定性的 4 个主要影响因子的自动测试技术进行了研究,建立了综合评价模型以及自动测试流程。研究成果已经成功应用于 CCD 相机及挡板的实验室自动测评中,为测试工作带来较大的便利,保证了

CCD 相机及挡板的可靠性,提高了测试速度与效率。

参 考 文 献

- 1 Jiao Hongwei, Qin Shiqiao, Hu Chunsheng *et al.*. Research on the coordinates calibration of pulse lidar and camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0108006
焦宏伟, 秦石乔, 胡春生等. 一种脉冲激光雷达与摄像机标定方法的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0108006
- 2 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622003
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中. 大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0622003
- 3 Song Zongxi, Zhao Baochang, Gao Wei *et al.*. Focal plane design of chang'e-1 satellite CCD stereo-camera and laboratory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3508~3504
宋宗玺, 赵葆常, 高伟等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机焦平面设计与辐射定标[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3508~3504
- 4 Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu *et al.*. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 78~81
周维, 胡东霞, 赵军普等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 78~81
- 5 Guo Zhongping, Hu Qian, Gao Bingning. The automatic alignment system for optical route by computer[J]. *Computer Engineering and Application*, 2003, (8): 208~210
郭仲平, 胡倩, 高炳宁. 光路自动准直计算机控制系统[J]. 计算机工程与应用, 2003, (8): 208~210
- 6 Li Jun, Liu Junhua. Study of reliability model for the multi-sensor fusion system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, **38**(8): 774~776
李军, 刘君华. 多传感器融合系统的可靠性模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, **38**(8): 774~776
- 7 Shang Yuanyuan, Guan Yong, Zhang Weigong *et al.*. Research on evaluation method of CCD image sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 317~322
尚媛媛, 关永, 张伟功等. CCD 固体成像器件性能测试方法的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 317~322
- 8 Cheng Shubo, Zhang Huige, Liu Hao *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0204001
程书博, 张惠鸽, 刘浩等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0204001
- 9 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0404001
程书博, 张惠鸽, 王哲斌等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0404001
- 10 Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui *et al.*. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214006
邱冬冬, 张震, 王睿等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0214006
- 11 Cai Yue, Ye Xisheng, Ma Zhiliang *et al.*. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si₂CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 457~461
蔡跃, 叶锡生, 马志亮等. 170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si₂CCD 的实验[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(2): 457~461
- 12 Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua *et al.*. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors [J]. *Infrared Millim Waves*, 2008, **27**(6): 475~478
林均仰, 舒嵘, 黄庚华等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(6): 475~478
- 13 Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing *et al.*. Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **12**(10): 1450~1453
沈洪斌, 沈学举, 周冰等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, **12**(10): 1450~1453
- 14 Zhang Zhen, Jiang Tian, Cheng Xiang'ai *et al.*. Gap on crosstalk line about CCD crosstalk effect induced by intense light and its mechanism [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1505~1509
张震, 江天, 程湘爱等. CCD 强光串扰效应的串扰线缺口现象及其机制[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(7): 1505~1509
- 15 Zhou Jianmin, Fu Youyu, Guo Jin *et al.*. Research on the soft damage of CCD induced by pulse laser [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 20~21
周建明, 付有余, 郭劲等. 脉冲激光对 CCD 的软损伤技术研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(2): 20~21
- 16 Zhong Hairong, Lu Qisheng, Wen Tiefeng *et al.*. Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 537~542
钟海荣, 陆启生, 文铁峰等. 激光辐射 CCD 的破坏机理分析[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(4): 537~542

栏目编辑: 韩峰