

# CCD 成像设备在强电磁脉冲环境下的效应实验研究

吴平<sup>1,2</sup>, 姜云升<sup>1,2</sup>, 徐志谦<sup>1,2</sup>, 黄刘宏<sup>1,2,3</sup>, 孟萃<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>清华大学工程物理系, 北京 100084;

<sup>2</sup>粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084;

<sup>3</sup>军事科学院国防工程研究院, 北京 100850

**摘要** 强电磁脉冲普遍存在于高能激光、X 光装置和未来战场等环境中, 这种恶劣的环境会对电子学设备, 尤其是承载特定任务而无法增加屏蔽手段的光学成像设备造成严重威胁。选用数码相机和分立的电荷耦合器件 (CCD) 摄像系统作为典型的效应物, 开展了光学成像设备在不同强电磁脉冲环境下的效应实验研究。通过实验观察到了成像设备功能异常、成像质量下降甚至端口部件烧毁等效应。对实验中观察到的效应及其发生的电磁场环境数据进行总结分析, 提出了应用于特定环境阈值下设备的失效概率, 即概率阈值的概念来衡量设备在恶劣环境下的生存状态的观点, 并给出了 CCD 成像系统的概率阈值曲线, 最后对此类型实验的开展和效应数据处理方法进行了探讨。本研究结果能为成像设备在强电磁环境下的状态评估及防护技术研究提供数据支撑和参考依据。

**关键词** 成像系统; 强电磁脉冲; 光学成像; 效应实验; 概率阈值

中图分类号 TN972

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0611002

## Experimental Research on CCD Imaging Equipment in Intensive Electromagnetic-Pulse Environment

Wu Ping<sup>1,2</sup>, Jiang Yunsheng<sup>1,2</sup>, Xu Zhiqian<sup>1,2</sup>, Huang Liuhong<sup>1,2,3</sup>, Meng Cui<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China;

<sup>3</sup>Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Beijing 100850, China

**Abstract** Intensive electromagnetic pulses are common in high-power laser and X-ray equipment and in various environments, such as future battlefields. This kind of harsh environmental factor can affect electronic equipment, especially optical-imaging devices that cannot be shielded well while performing specific imaging tasks. Herein, we choose a digital camera and discrete charge coupled device (CCD) camera system as typical devices used for testing. We investigate the effects on optical-imaging device when the device is subjected to an intensive electromagnetic environment. We observe such effects as equipment malfunctions, decline in imaging quality, and module destruction. Herein, the observed effects and relevant electromagnetic environment data are summarized and analyzed. We promote the idea of using failure-probability thresholds under certain environmental conditions to measure the equipment viability. We provide the probability threshold curve for the CCD imaging system. Finally, we discuss the experimental method to investigate the electromagnetic effects. This work can provide supporting data and referable experience for others' evaluation and protection of equipment subjected to intensive electromagnetic environment.

**Key words** imaging systems; intensive electromagnetic pulses; optical-imaging; experiment of effects; probability threshold

**OCIS codes** 110.2960; 140.3538; 060.4261; 340.7480

## 1 引 言

随着成像技术的发展, 光学成像设备广泛应用

于工业生产、复杂物理实验、国防军事等领域。可靠性高、光学性能稳定的成像器件能实现精确的光学信息获取, 在物理信号获取、战场态势监测、武器精

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-15

\* E-mail: mengcui@mail.tsinghua.edu.cn

确导航等方面具有重要价值。但是随着核反应、高能脉冲技术的发展,在存在高压电源线、磁控管、高能激光等装置的相关工业产品环境、物理实验环境及未来战场环境中,都存在着包括核电磁脉冲(NEMP)、高功率微波(HPM)、超宽带微波(UWB)及其他类型的瞬态强电磁环境。不同于稳态的时谐电磁场,瞬态强电磁脉冲的持续时间短,频谱成分复杂,瞬态场强极高。瞬态强电磁脉冲能通过天线、电源线、信号线和机箱孔缝等耦合到系统内部,对电子元器件、线路甚至整个系统造成一定损坏,如电路开关跳闸或触发器翻转、磁存储器消磁、微处理器代码改变、电子元器件击穿等损坏,或瞬时干扰。而目前市面上的计算机、成像设备通常只通过了常规的电磁兼容性(EMC)标准测试,在瞬态强电磁辐射威胁的环境下,其稳定性、数据准确度及功能可靠性会面临巨大威胁。因此,研究成像设备在复杂电磁环境下的抗扰度与综合效应评估,是工程应用领域的迫切需求。

据笔者了解到的国内相关研究,西北核技术研究所、解放军各科研院所等单位均开展过电子计算机、单片机等设备的电磁场辐照实验<sup>[1-2]</sup>,并总结了相应的强电磁辐照效应。然而,由于大范围、均匀的强电磁场环境产生的实验条件极为苛刻,部分效应物功能结构复杂、成本高昂等原因,辐照实验表现出了效应的随机性大、可重复性低、阈值提取置信度较低等情况。因此,上述单位就如何进行设备辐照实验设置,以及如何在效应多样情况下利用小样本数据对全系统的可靠性进行评估展开了相关研究<sup>[3-5]</sup>。

国外很早就针对电子设备在强电磁环境下的效应及评估进行了研究。据公开的学术资料及国防报告显示,瑞典国防部<sup>[6-7]</sup>、美国空军和海军武器实验室<sup>[8]</sup>等机构早在 20 世纪六七十年便开始建造大型的装备强电磁脉冲环境的模拟实验平台,并开展了飞机、舰船等装备的大量整机效应实验;美国马里兰大学<sup>[9-10]</sup>、新墨西哥州大学<sup>[11]</sup>等单位一直致力于研究随机耦合模、电磁拓扑等理论在电磁脉冲辐照效应计算和评估中的应用。但更多的测试方法、评估理论与技术细节尚未见有相关报道。

本文利用高功率微波及核电磁脉冲模拟装置实验系统,针对不同集成度的成像系统,进行了不同类型强电磁辐射的辐照效应实验,研究成像系统在强电磁环境下的损伤规律,为成像器件在复杂电磁场环境下的防护提供参考和依据。

## 2 辐照实验及效应物设置

### 2.1 实验效应物

本次实验关注的效应物是 CCD 光学成像设备。光学成像设备根据应用场合、工作环境以及成像清晰度、速度、像素阵列大小等具体要求进行选择,不同的 CCD 设备在结构复杂度、集成程度上存在着巨大差异。但从原理组成上来看,其核心可以划分成四大模块:光学成像传感器、电子驱动及读出电路、数字传输及采集、数据及图像处理终端,如图 1 所示。

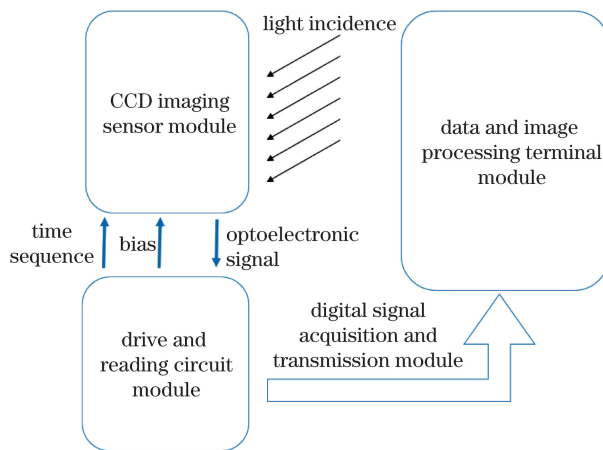


图 1 CCD 成像设备典型功能模块示意图

Fig. 1 Typical function module of CCD imaging equipment

包含了大量半导体器件和传输线的电子电路模块在复杂的电磁脉冲环境下面临着信号干扰、丢失,甚至结构损毁等风险<sup>[7, 12-13]</sup>。为了对这些风险进行科学评估,需要对成像器件在强电磁环境下开展效应实验研究,获取并总结其效应类型、效应发生阈值规律、易损方位及易损模块等信息。为了在观察设备总体效应的同时区分成像设备较为敏感和薄弱的环节,本研究采用全面集成的小型数码相机,以及由 CCD 摄像机、数据传输线、数字采集卡、计算机终端组成的分析系统作为两类效应物进行实验。

本次实验采用的效应物如下:Sony DSC-W830 数码相机;分立 CCD 摄像系统,包括台湾敏通 MTV-1881EX 高解析度高灵敏度 CCD 摄像机(795 pixel×596 pixel)、Choseal Q722 AV 数据传输线(1.5 m);Citytech 数据采集卡;ThinkPad S3-S440 计算机终端。

### 2.2 强电磁环境实验设置

本次实验采用了 X 波段、C 波段的窄带高功率微波源,超宽带高功率微波源及核电磁脉冲(NEMP)双指数脉冲源作为激励装置。窄带及超宽带高功率微波脉冲实验布置如图 2(a)所示,高功率

微波的功率和重复频率等参数可以通过控制台进行调节并进行波形监测,当控制台发出触发指令后,脉冲信号产生电路触发,并将高频信号馈入横电磁波(TEM)喇叭天线并向实验场域辐射电磁能量。被测设备放置于距喇叭天线 3~5 m 的中轴线上,符合远场要求,且由于测试场所为微波暗室和开阔地带,故而可以忽略微波的折反射。测试区域的场强和功率密度直接通过天线远场模型公式计算得到。NEMP 双指数脉冲实验布置如图 2(b)所示,使

用 GTEM 小室(gigahertz transverse electromagnetic cell)作为电磁场发生装置,当 NEMP 双指数高压源馈入 GTEM 小室时,小室的内极板与外壁之间形成较为均匀的场分布,其空间波形及场强数据采用本实验室自主研制的 D-dot 进行测量获取。实验所用的强电磁环境发生装置参数在表 1 中详细给出。上述实验开展均在符合资质的电磁兼容实验室中进行,故可以忽略其他电源传导、近场空间辐射等干扰因素的影响。

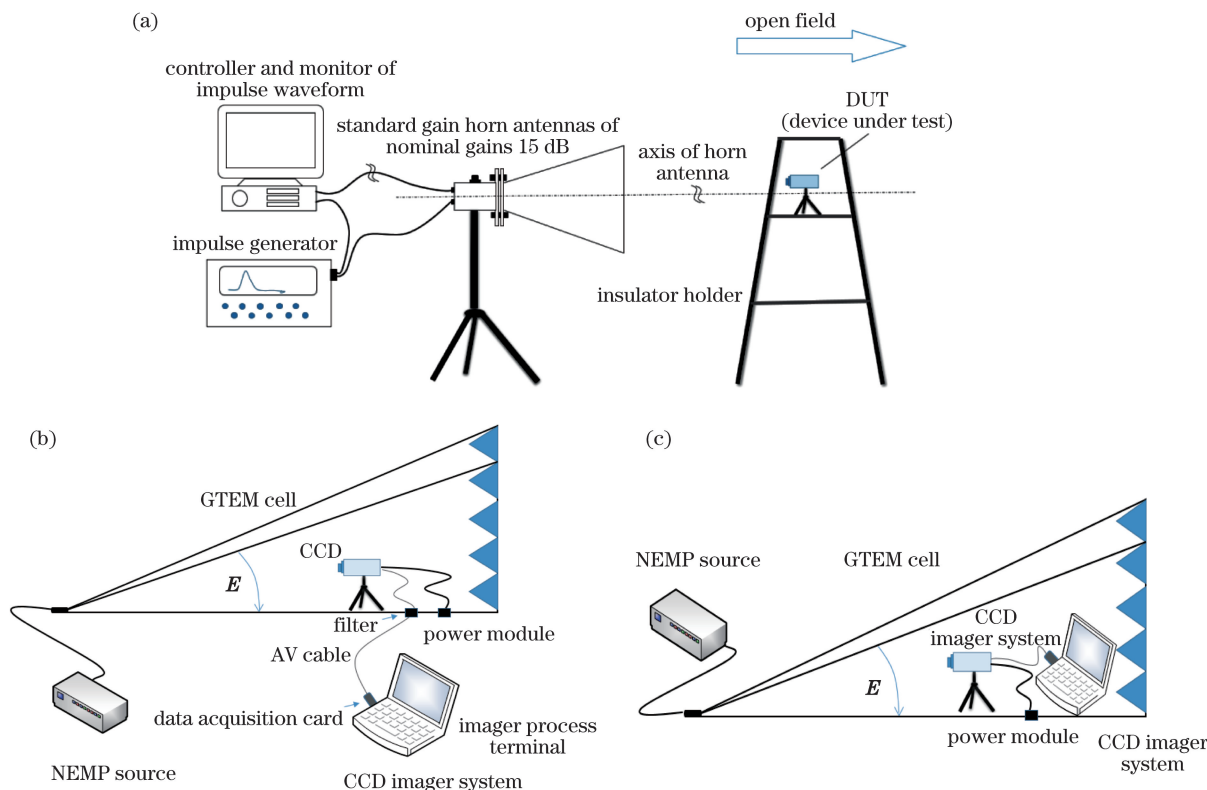


图 2 高功率微波及双指数 NEMP 实验设置示意图。(a)高功率微波实验设置图;

(b)全系统暴露的双指数 NEMP 实验设置图;(c) CCD 摄像设备单独暴露的双指数 NEMP 实验设置图

Fig. 2 Experimental setups of high-power microwave and double-exponential NEMP. (a) Experimental setup of high-power microwave; (b) experimental setup of double-exponential NEMP under exposure of whole system ; (c) experimental setup of double-exponential NEMP under isolated exposure of CCD camera

表 1 强电磁场实验装置参数

Table 1 Test equipment parameters of intensive electromagnetic field

Parameter	Field strength /( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Repetition frequency /Hz	Frequency feature /GHz	Output equipment
X band	6-10	10-500	Center frequency: 9.4	Horn antenna
C band	2.6-40	1-500	Center frequency: 5.49	Horn antenna
Ultra wide band	80-180	1-100	Bandwidth: 0.1-0.5	TEM horn antenna
Double-exponential pulse	0.4-10	1	Bandwidth: 0.3	GTEM cell

由于电磁脉冲辐射场耦合效应影响的因素较多,且效应较为复杂,故而本次实验设置了多组对照

变量进行实验:1)全系统暴露和 CCD 成像设备单独暴露在辐射场下的对比实验;2)便携式 CCD 数码相

机和分布式 CCD 监视器的对比实验;3)不同波段、带宽、功率、重复频率、入射方向等电磁场参数的对比实验。

由于复杂系统电磁脉冲辐照效应的本征不确定性,对于同样的实验设置及电磁环境,在设备各个敏感点耦合的电磁能量和对应出现的效应都会出现一定的离散和随机性,因此认为设备效应的阈值不应该是一个确定的值,而应该是服从一定模型分布的概率阈值。为了验证该观点并获得概率阈值的分布,进行了一系列效率阈值实验,实验流程如图 3 所示。设计了预实验,用以确定阈值的大致范围,出现效应后降低场强进行多次重复实验,以确定该场强下的失效概率。

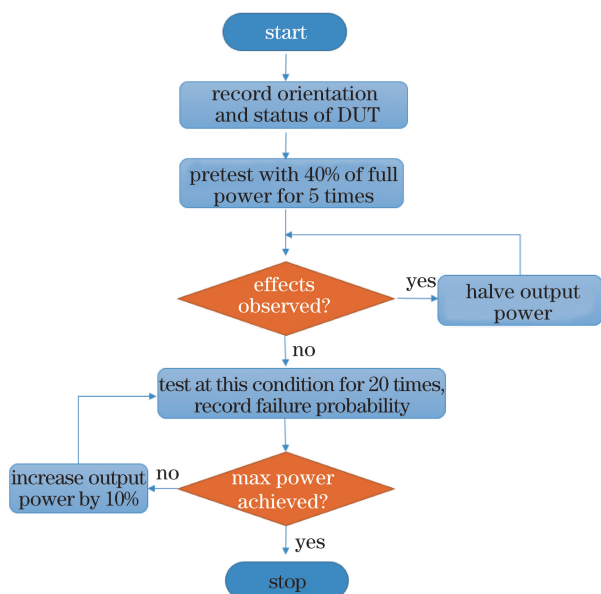


图 3 效应概率阈值实验开展流程图

Fig. 3 Flow chart of effect probability-threshold test

### 3 强电磁环境实验效应分类及程度判定

#### 3.1 效应描述

实验中观察到的效应可以分为损毁效应和干扰效应两种。其中:损毁效应仅在峰值场强达到 200 kV/m 的超宽带微波测试中的数字采集卡上观察到;干扰效应则在所有实验组中均可观察到,主要表现为图像数据扰动、数据记录软件中断运行及计算机终端保护性断电关机三种类型。不同实验组的具体效应如下。

##### 1) X 波段 HPM

分立 CCD 监控系统出现的效应为:录像中断,图像信息部分丢失;出现数据端口的电流浪涌警告;图像出横向异常亮带。数码相机出现的效应为录像

状态停止;系统死机,重启后正常;录像文件部分损坏。

##### 2) C 波段 HPM

分立 CCD 监控系统出现的效应为:录像中断,图像信息部分丢失;计算机终端内存读写失常,操作卡顿,重启后恢复;计算机终端黑屏,重启计算机后恢复,图像信息丢失;图像出现横向异常亮带。数码相机出现的效应为:关机并回收镜头;死机,镜头未收回,重新通电后才可重启;录像文件部分损坏。

##### 3) 超宽带 HPM

分立 CCD 监控系统出现的效应为:录像中断,图像信息部分丢失;计算机终端黑屏,重启计算机后恢复,图像信息丢失;图像出现横向异常亮带;数据采集(DAQ)卡烧毁。数码相机出现的效应为:自动跳出录像状态,系统操作正常,录像存储正常;死机,镜头未收回,重新通电后才可重启;录像文件损坏。

##### 4) 双指数脉冲

分立 CCD 监控系统出现的效应为:录像中断,图像信息部分丢失;图像出现横向异常亮带。数码相机出现的效应为:录像颜色失真,持续时间数秒至数十秒,重启后正常;图像采集异常,声音录入正常;重启后恢复。

观察上述效应类型及发生概率在不同对照组中的差异时发现,效应发生概率整体上会随高功率微波的脉宽、重复频率和脉冲个数的增加而增大,但是控制单个变量增加时未观测到效应发生概率出现理想的单调变化,笔者认为这是变量可调范围过窄造成的,具体原因还有待进一步研究。在摄像设备单独暴露和全系统暴露的对照实验组中,未观察到失效概率及图像畸变程度出现明显差异。可以推测,电源与数据连接线对双指数脉冲 NEMP 效应的影响不大。从上述效应现象的总结可以看出,CCD 成像系统受到的干扰效应主要有 CCD 成像器件本身的信号失真和计算机终端的逻辑运算功能失常,从而导致正常的图像采集功能及采集到的信号可信度受到影响。而毁伤作用主要发生在暴露于强场下的长导线相连的电源、数据端口,例如本系列实验中的数据采集卡,即使被放置在金属屏蔽箱中,依旧观察到了电路元器件被击穿的毁伤案例。

首先关注设备出现异常工作状态的情况,以 C 波段高功率微波重复频率 50 Hz 的实验数据为例,对所有测试结果进行失效概率与场强关系的统计,即得到图 4 所示的传统失效概率曲线。

然而,由于强电磁脉冲对 CCD 系统构成的干扰

效应较为多样,不同效应对应不同的概率阈值分布,故要对整体系统的辐射抗扰度做出合理的评估,就需要对不同的效应进行失效等级划分,根据失效严重程度对现象进行数值化,得到干扰效果与场强等关键电磁脉冲场因素的定性关系。下面列出了分离式成像系统在实验中的受扰描述、等级划分及失效因子,其中失效因子主要根据数据损失程度、系统受扰后所需的恢复成本而定。

1) 效应分级 A: 图像采集自停止, 已存数据未丢失; 内存读写堵塞, 系统卡顿, 一段时间后自动恢复; 失效因子定义为 0.2。

2) 效应分级 B: 图像采集自停止, 已存数据未丢失; 显示屏出现异常, 注销并清空内存数据后恢复正常; 失效因子定义为 0.4。

3) 效应分级 C: 图像采集自停止, 已存数据部分损坏; 系统严重卡顿, 需强制重启后才能恢复正常; 失效因子定义为 0.5。

4) 效应分级 D: 计算机死机, 重启后正常工作; 图像数据存储失败或者全部丢失; 失效因子定义为 0.8。

5) 效应分级 E: 计算机死机, 电源开关失效, 需重新通电后才能重启; 数据采集卡或者电源、数据端口电路损毁; 图像数据存储失败或全部丢失; 失效因子定义为 1。

失效因子的判定具有一定的主观性, 具体数值的选择需要与效应物承担的具体任务容错率有关, 本研究定义的数值仅是为了体现复杂系统存在概率失效这一物理特性。应用该失效因子的加权, 可以得到如图 4 所示的等级加权失效概率与场强的关系曲线。

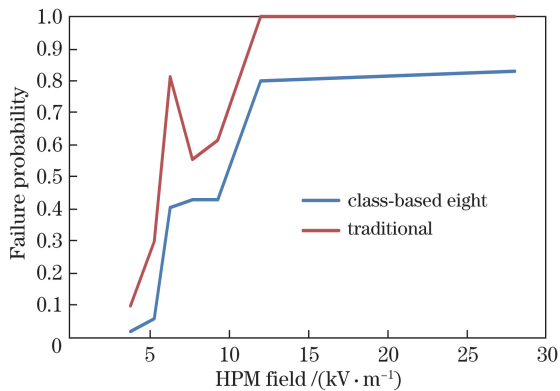


图 4 两种失效概率的对比

Fig. 4 Comparison of two kinds of failure-probability

由上述数据可以看出, 由于干扰效应存在一定的随机性, 失效概率虽然呈现出随场强增加而增大

的趋势, 但是当考虑到受扰程度的严重性时, 设备的失效概率和失效因子的加权平均系数还是与入射电磁脉冲的场强呈较好的正相关性。实验表明: 计算机终端的概率失效阈值较低, 仅为 4 kV/m 左右就可能存在受扰的风险; 且即使暂时没有观察到明确的永久性损伤, 但当入射场强超过 12 kV/m 时, 图像监控终端基本就没有正常工作的可能性了, 因此对计算机处理终端进行电磁环境隔离、金属屏蔽、线缆及孔缝滤波是十分必要的。

### 3.2 信号干扰水平数值化

除了在图像监测终端的计算机逻辑功能模块上即时显现出干扰现象外, 电磁脉冲也可能会同时对 CCD 传感器本身的像素点感光、光电荷耦合输运、电荷信号读出、电压信号放大等成像过程中的模拟电路存在威胁和干扰。本系列实验将整个系统辐照数据与 CCD 成像模块单独辐照数据进行对比, 将采集到的图像数据进行灰度值的统计分析, 对 CCD 成像器件本身的干扰效应进行描述及评估。

在本系列实验中, CCD 成像设备的镜头由镜头盖覆盖, 故而静息状态下 CCD 采集到的图像为暗场图像。在此条件下进行电磁脉冲环境的测试, 实验中观察到 CCD 相机捕捉到的视频图像会在电磁脉冲入射时出现位置随机的横向带状亮斑。图 5(a) 为强电磁场入射瞬间受扰图像的单帧图像, 可以看到受扰图像下方出现了明显的横向亮纹。取单列像素元灰度作图即可以得到图 5(b) 所示的单列亮度曲线图。由图 5 可以看到亮度畸变呈现尖峰衰减脉冲的形状, 该形状类似于系统某部件经历了瞬态电磁能量耦合, 然后又呈指数衰减释放的物理情景, 但其具体的效应机理还需要根据该设备的电路原理进行分析、实验才能确定, 本研究暂不涉及。

为了更直观地描述电磁脉冲入射对图像像素数据的影响, 本研究将二维帧数据进行维度压缩, 以便加入时间维度进行观察, 同时采用灰度值对暗场图像像素元数据畸变进行量化, 实现视频图像数据的时域数值化处理。

用  $G_{X-Y-t}$  表示第  $t$  帧画面中横纵坐标为  $(X, Y)$  的像素元灰度值。考虑到脉冲入射后图像亮度畸变在横向上的一致性较高, 将每一帧图像进行横向维度压缩, 即把二维像素阵列中的横向像素元灰度加

和得到行灰度值  $G_{Y-t}^{(X)} = \sum_{X=1}^{500} G_{X-Y-t}$ 。

当电磁脉冲入射后, 个别行出现横向亮斑, 就会反映在该帧数据中相应点的灰度值上, 将视频文件

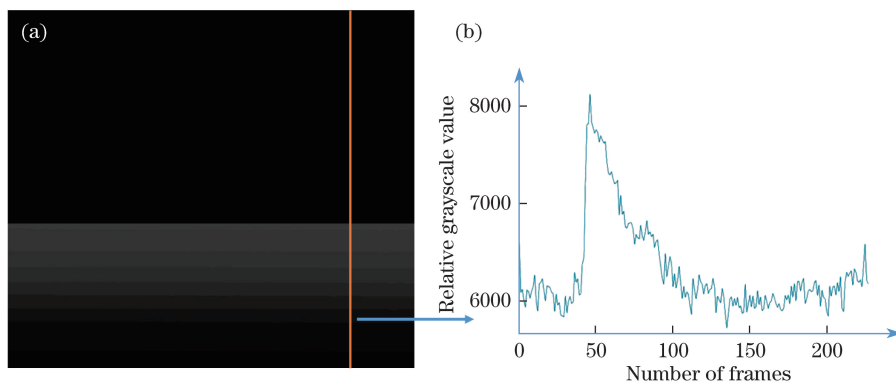


图 5 电磁脉冲入射瞬间的(a)单帧图像示意图和(b)单列像素相对灰度值曲线

Fig. 5 (a) Schematic of single-frame image and (b) relative grayscale value curve of single-row pixels at incident of EMP

逐帧的数据进行提取,并沿  $x$  轴方向进行排列,即可以得到 CCD 图像采集装置拍摄图像时域上的亮度畸变情况。

图 6 为 CCD 成像设备单独放置于场强为

6000 V/m 双指数脉冲 GTEM 小室内出现的亮度畸变单帧画面,以及经过处理后的时域灰度畸变图。由图 6 可以看到脉冲入射引起的亮度畸变在随机的行数中出现。

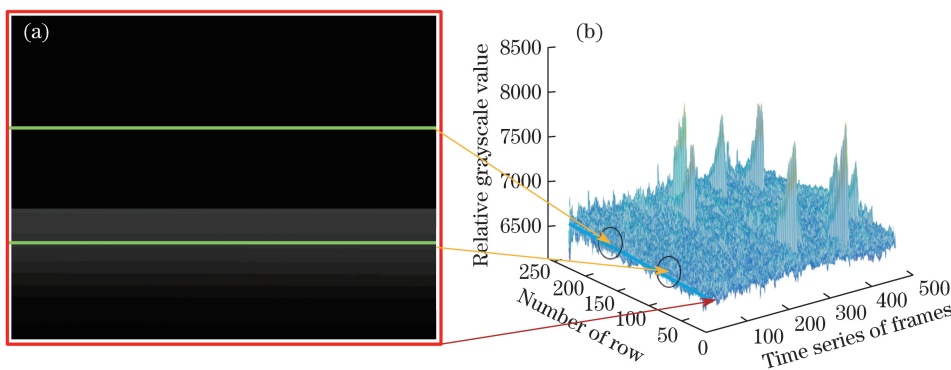


图 6 (a)单帧亮度畸变与(b)一次维度压缩示意图

Fig. 6 Diagrams of (a) single-frame luminance distortion and (b) one-rank dimension compression

上述处理方法可以进一步压缩帧数据的维度,将每一帧数据进一步压缩到仅用一个灰度范围表示,即  $G_t^{(XY)} = [(G_{Y-t}^{(X)})_{\min}, (G_{Y-t}^{(X)})_{\max}]$ 。这样能得到如图 7 所示对视频图像随时间变化的直观表现,可以看出每个脉冲对像素元灰度畸变的影响一般都局限在一帧图像内,且亮度畸变涨落较大。

### 3.3 阈值概率成因及实验方案讨论

一般情况下,讨论敏感对象的失效问题,会致力于通过实验和理论分析提取其失效阈值,这对于能量集中、敏感对象结构简单、物理模型清晰的测试是准确且便捷的,例如分立晶体管的功率注入实验,能快速准确地获得以特定数值为中心呈高斯分布的阈值实验结果。然而,诸如本系列实验针对的情景,更多情况下关注的敏感对象是功能和结构繁多的复杂系统,其能量传递、功能权重、管脚电平存在多样性和不确定性。同时,电磁脉冲辐照这一实验场景本身具有较大的不确定性,这两类

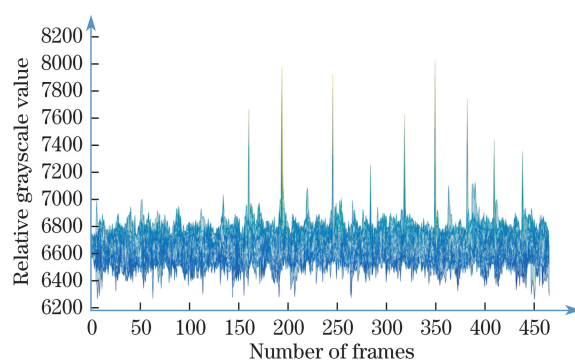


图 7 二次维度压缩后的时域灰度图

Fig. 7 Grayscale plot in time domain after two-rank dimension compression

不确定因素共同决定了敏感对象的受扰、受损效应的阈值离散化,相同条件下是否出现失效成为概率事件。

本研究所进行的实验均根据辐照源的特性尽可能选取了较高的重复实验次数和较小的功率输入间

隔,获得了较为精细的概率阈值曲线。但由于超功率脉冲源稳定性和重复效率等原因,实验的时间成本较高,要获得具有更高统计准确性的数据难度较大,但对于和强电磁环境中成像装置的评估方法和科学实验理论都具有较高的参考价值。

## 4 结 论

通过上述系列实验结果及概率阈值成因讨论可以看出,CCD光学成像系统在高功率的电磁环境下会出现诸多受扰甚至损毁效应。具体的效应与电磁场的场强呈较强的相关关系。本实验中采用的成像系统在3 kV/m以下的电磁脉冲场下没有出现明显的信号受扰情况;当场强达到5 kV/m以上即可稳定地观察到较为明显的亮度畸变,同时计算机终端开始出现程序自动停止等轻微受扰现象;当场强达到10 kV/m以上时,计算机终端出现较频繁的受扰现象,并严重影响图像采集系统的正常工作;当场强达到80 kV/m以上时,会对数字采集卡及其他硬件设备造成严重的毁伤风险。

宏观上看,对于分立的成像系统来说,孔缝较多、电子元件丰富度较高的计算机终端较易受到干扰而发生失效,需要根据需求采取整体屏蔽、孔缝及接口滤波等硬件加固手段;此外,因为发现大量重启即可恢复的软损伤案例,也可以尝试在系统和软件上设置分区存储、定时清理存取内存数据、分区重新通电等手段来增强计算机的抗扰度。处于较为封闭金属空间内的CCD成像器件及驱动电路的稳健性较强,除了亮度畸变,未观察到更严重的受扰或毁伤案例。值得关注的是,由于与较长的数据传输线相连,数字采集卡在频带较低、场强较高情况下的可靠性较差,在实际工程设计时需要进行特殊设计和加固考虑。

## 参 考 文 献

- [1] Yang J, Li Y B, Yan M H, *et al.* Experimental research on damage effects of L-band high power microwave to computer equipments[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(2): 80-85.  
杨杰, 李跃波, 闫民华, 等. L波段高功率微波对计算机的损伤效应实验研究[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 80-85.
- [2] Pan F, Yu T B, Li Y X. The study of coupling experiment about interface of microcomputer under electromagnetic pulse[J]. *Safety & EMC*, 2001(3): 12-16.
- [3] Shi L H, Zhang X, Ma R P, *et al.* Small sample electromagnetic pulse effect test and evaluation method[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 14(4): 441-447.  
石立华, 张祥, 马如坡, 等. 基于Weibull分布的小子样电磁脉冲效应实验与评估[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(4): 441-447.
- [4] Zou X Y, Yao R H. Small sample statistical theory and IC reliability assessment[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(3): 241-245, 250.  
邹心遥, 姚若河. 小子样统计理论及IC可靠性评估[J]. *控制与决策*, 2008, 23(3): 241-245, 250.
- [5] Li W L, Yuan D N, Liu H Z, *et al.* Reliability research on the mechanism system wear simulation under the case of the small-scale sample[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 235-244.  
李文丽, 原大宁, 刘宏昭, 等. 小子样下机构系统磨损仿真可靠性研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 235-244.
- [6] Bäckström M, Löfstrand K G, Nordström B. The Swedish microwave test facility: technical features and experience from system testing[C]//*Proceedings of 27th General Assembly of the URSI, August 17-24, 2002, Maastricht, The Netherlands*. [S. l.: s. n.], 2002.
- [7] Backstrom M G, Lovstrand K G. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 396-403.
- [8] Baum C E, Higgins L D, Cummings D B, *et al.* Electromagnetic design calculations for ATLAS I, design 1[R]. [S. l.]: Sensor and Simulation Note 153, 1972.
- [9] Gradoni G, Antonsen T M, Anlage S M, *et al.* A statistical model for the excitation of cavities through apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(5): 1049-1061.
- [10] Gradoni G, Chen X M, Antonsen T M, *et al.* Random coupling model for wireless communication channels[C]//*2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, September 1-4, 2014, Gothenburg, Sweden*. New York: IEEE, 2014: 878-882.
- [11] Li X, Meng C, Liu Y N, *et al.* Experimental verification of a stochastic topology approach for high-power microwave effects[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(3):

448-453.

- [12] Hong J I, Hwang S M, Huh C S. Susceptibility of CMOS IC devices under narrow-band high power electromagnetic waves by magnetron[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2009, 23(5/6): 571-582.
- [13] Nitsch D, Camp M, Sabath F, *et al.* Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 380-389.