

# 强辐射环境下电子系统抗辐射技术研究

刘成安<sup>1 2 3</sup> 张 华<sup>2</sup> , 李众立<sup>2</sup>

( 1. 中国科学院地球化学研究所地球内部物质高温高压实验室 , 贵阳 550002;  
2. 西南科技大学 四川 绵阳 621010; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 随着核工业、航天航空等行业的发展, 目标定位系统是相关设施正常运行、维护、事故应急处理的重要技术基础, 是目前高技术研究的热点领域, 该系统的抗辐射能力是决定其正常工作前提。通过实验对钴 60 强辐射环境下摄像机、控制电路的抗辐射性能研究, 确认了电子系统中摄像机、单片机、晶闸管等器件的损坏主要是由辐照累计量决定。并设计了一个目标定位系统的屏蔽体, 经过实验检验, 防护后系统工作时间可延长 2~4 倍。

关键词: 强辐射环境; 钴 60; 抗辐射加固; 目标定位

中图分类号: O57 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2014)02-265-04

强辐射环境是极端环境之一<sup>[1]</sup>, 核电站、空间探测、食品辐照等行业中, 相关设施的正常运行、维护、事故应急处理等环境均属于此范围<sup>[2]</sup>。近年来, 日本福岛核危机等核灾难事故的发生<sup>[3]</sup>, 以及我国空间技术的快速发展都对抗辐射技术提出了迫切的需求<sup>[3]</sup>。抗辐射机器人是代替人类在这种环境下进行各种处理与处置有效途径。实现机器人在强辐射环境中正常运行的基础与前提, 必须有效获取相关的地形、目标位置等信息<sup>[4]</sup>, 获取这些信息主要依靠目标定位技术。在强辐射环境中, 电子系统的正常运行必须依靠抗辐射加固技术作为保障<sup>[5]</sup>。它是指为电子系统、仪器等在辐射环境中仍能完好并可靠地完成各种预定功能而采取的各种技术措施<sup>[6]</sup>。本文通过实验对强辐射环境下目标定位系统中的摄像机、控制电路等进行了抗辐射实验, 对其辐照损伤机理和防护技术进行了研究。

## 1 实验方案

实验在某辐照厂的辐射厅进行, 该辐照厅辐照源钴 60, 其能量级为 1.25 兆电子伏特, 实际源活度为 21 万居里。实验中的实验样品放置在距离源架中心约 910 mm 的位置, 该位置辐照剂量率为 20 Gy/min。

实验对目标定位系统中的摄像机、控制电路进行了抗辐射实验。摄像机抗辐射实验选用摄像机为普通的小型 CMOS 图像传感器摄像机, 其性能参数: 50 万像素, 1/4 英寸镜头, 分辨率为 420 TVline, 最低照度为 1 Lux, 供电电源为 DC12 V。控制电路抗辐射实验采用的实验电路包括一块由晶闸管、霍尔传感器为主要元件组成电路板和一片可拆卸的直插式单片机芯片组成, 如图 1 所示。实验以未加屏蔽与采用屏蔽室屏蔽两种方式进行试验。屏蔽室的材料为铅砖及铅玻璃, 铅砖厚度为 10 mm 及 40 mm, 铅玻璃厚度为 30 mm, 屏蔽室的光通道由 30 mm 铅玻璃屏蔽, 其余部分有铅砖构成。

摄像机实验通过对不同时间采集摄像机所拍摄

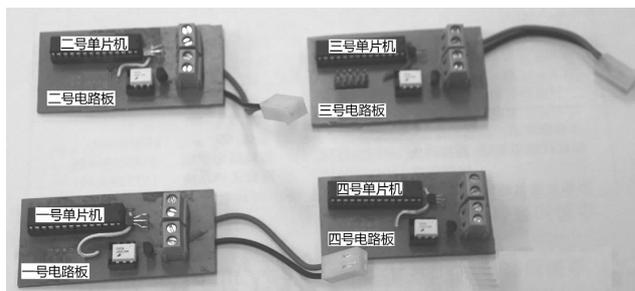


图 1 辐照实验电路实物图

Fig. 1 The circuit boards for irradiation experiment

收稿日期: 2013-04-20; 改回日期: 2013-08-36

基金项目: 国防核能专项(201111137)、四川省科技厅应用基础研究(2011JY0059)资助项目。

第一作者简介: 刘成安(1965-), 男, 副教授, 主要从事环境科学与工程研究, E-mail: lch@swust.edu.cn.

的图像质量的分析来对受损情况进行判断。控制电路实验通过联结到辐照厅外的指示灯状况进行分析。

## 2 摄像机抗辐射实验

摄像机抗辐射实验一共进行了两次,一次是未加屏蔽的摄像机实验。该实验位置实测的 $\gamma$ 射线辐照剂量率为20 Gy/min,在实验中,经过约17 min辐照,摄像机便无法识别图像,表明已损坏。实验过程中摄像机累积吸收辐照剂量为340 Gy。

第二次实验为采用屏蔽室屏蔽摄像机实验。实验结果如表1所示。

从屏蔽防护后对摄像机实验结果可以知道,实验初期由于 $\gamma$ 射线的累计辐照剂量较低,对于电子设备的影响表现为以 $\beta$ 射线释放的高能电子引起的纹状干扰为主。而随着 $\gamma$ 射线释放的光子在半导体芯片上积累的辐照剂量不断增加,雪花状亮斑的影响不断加剧,并最终造成了摄像头CMOS芯片永久性损坏。

两组对比实验CMOS芯片实际损坏的辐照时间和接受累计辐照剂量为:无屏蔽的第一组实验辐照时间为17 min,接受累积辐照剂量约340 Gy;进行防护后的第二组辐照时间为185 min,屏蔽体接受累积辐照剂量约3700 Gy。根据屏蔽体内实测的辐照率为1.8 Gy/min计算,接收的累计辐照剂量333

Gy。理论上带电工作状态下电子系统受到 $\gamma$ 辐射损伤存在着剂量率和辐射累计量两个因素的影响<sup>[7]</sup>。剂量率的损伤存在损伤阈值,通常约为104 Gy/s。辐射累计量值则由系统中各个元件的永久损伤阈值来决定。以上实验结果表明,在辐照厅的辐照率下摄像机能正常工作,其损伤主要是由累计辐照剂量决定的。同时表明铅室对 $\gamma$ 射线起到较好的屏蔽作用,其使得摄像机的工作时间延长了近10倍。

## 3 控制电路抗辐射实验

控制电路抗辐射实验一共进行了4次,实验条件及实验结果如表2所示。各次实验中屏蔽室的屏蔽情况为1号为无屏蔽,2号屏蔽室由10 mm厚铅砖及30 mm铅玻璃构成,3号和4号由40 mm铅砖及30 mm铅玻璃构成。

在实验3的过程中发现,经过辐照实验后铅玻璃颜色由实验开始时的透明变为茶色,透光性能明显下降,但经过一段时间的放置又恢复成透明状态。这表明铅玻璃的透光性能在长时间辐照下会产生变化,对电子系统的信息采集会产生不利影响。

实验结果表明,单片机损坏时的辐照累积剂量约为580 Gy,晶闸管损坏时的累积辐照剂量为1330 Gy,因此在进行实验的元器件中,单片机最易损坏,而霍尔传感器的抗辐射能力较强。

表1 屏蔽摄像机辐照实验

Table 1 Irradiation experiments of the camera

照射时间(min)	辐照剂量(Gy)	实验结果
0	0	有轻微雪花点,电磁干扰影响画质。
63	113	雪花点渐多,电磁干扰无明显变化。
108	194	电磁干扰影响相对减弱,雪花点为主要影响画质因素。
135	243	雪花点更加明显,电磁干扰影响可忽略。
185	333	雪花点更加密集,图像效果已恶化,可以认为摄像头已失效。
194	349	图像基本消失,亮度极低,可以认为摄像头已经损坏。

表2 控制电路抗辐照实验

Table 2 Irradiation experiments of the circuit boards

实验编号	实验材料				实验条件			实验结果
	屏蔽厚度(cm)	晶闸管	霍尔元件	单片机	时间(min)	辐射量(Gy)	累计辐射量(Gy)	
1	0	1	1	1	29	580	580	单片机
2	1+3	1	1	2	55	580	580	单片机
3	4+3	2	2	3	116	580	580	单片机
4	4+3	1	1	4	34	170	1330	晶闸管

单片机实验结果表明,单片机在辐照厅的辐照率下能正常工作,其损伤主要是由辐照累计量决定。不同防护条件下,发生损坏时的辐照累计剂量均为 580 Gy。实验同时表明铅室对  $\gamma$  射线起到较好的屏蔽作用,屏蔽效果与屏蔽材料的种类与厚度有关,在采用 10 mm 铅砖时,其可使单片机工作时间延长近 1 倍;采用 40 mm 铅砖加 30 mm 铅玻璃时,可延长 4 倍。

#### 4 电子系统抗辐射屏蔽罩

通常抗辐射加固的设计思想是针对强辐射环境下的电子系统的工作特性,对所有处于强辐射环境下的电子设备进行合理的抗辐射设计和处理,主要是从抗辐射器件的选择、抗辐射电路设计和设备整体屏蔽等几个方面进行<sup>[6]</sup>。电子系统中的摄像机和激光测距仪是抗辐射保护的重点,由于它们属于高精度测量仪器,难以从结构上进行改造,因此其辐射防护采用铅砖和铅玻璃材料做屏蔽体方式。

根据摄像机抗辐射实验结果,结合其工作原理,设计了屏蔽罩,如图 2 所示。屏蔽罩主体采用国标一号铅锭加工而成,主体由左右两部分构成,屏蔽罩前面铅层为 40 mm,内嵌两块 30 mm 厚铅玻璃,其余各面为 10 mm 厚度铅层。在激光测距仪出光孔和摄像机镜头取景处需要有光线处,使用透明的铅玻璃屏蔽,实验材料为 ZF7 型铅玻璃。在接口处的结构上,设计为阶梯式的切入式倒角和嵌入式倒角,可以保证激光的发射、接收方向与铅玻璃所在平面成垂直关系,避免激光因为铅玻璃折射带来测量误差。

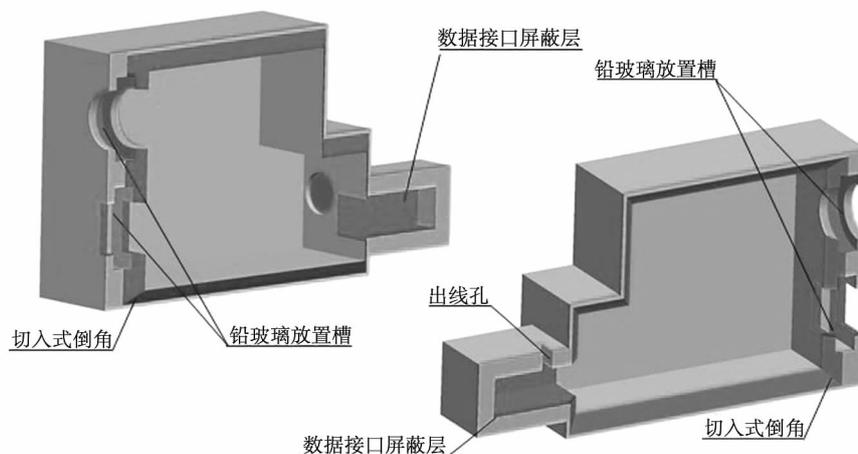


图 2 激光测距仪、探测相机防护罩机械设计

Fig. 2 The mechanical design of the laser range finder and detection camera's shield

#### 5 结果与分析

采用该屏蔽罩对 Point Grey 公司的 Bumblebee2 双目相机和 Mesa Imaging 公司的 Swiss Ranger 4000 3D 激光测距相机构成的目标定位系统传感器进行抗辐射实验。辐射实验结果表明,采用该屏蔽罩防护后,目标定位系统的工作时间可延长 2~4 倍。

根据辐射防护理论,屏蔽效果与屏蔽材料的种类与厚度有关。电子系统抗辐射屏蔽罩与控制电路抗辐射实验的屏蔽结构相似,控制电路抗辐射实验表明,单片机损坏时的辐照累积剂量约为 580 Gy,采用 10 mm 铅砖与 30 mm 铅玻璃时,与不进行屏蔽处理比较,单片机工作时间由 29 min 延长为 55 min,工作时间延长约 2 倍,这个实验结果表明,采用这种屏蔽方式,可以将实验点的辐照剂量率由不进行屏蔽时的 20 Gy/min 降低至 10.55 Gy/min (580 Gy/55 min);采用 40 mm 铅砖加 30 mm 铅玻璃时,与不进行屏蔽处理比较,单片机工作时间由 29 min 延长为 116 min,工作时间延长约 4 倍,这个实验结果表明,采用这种屏蔽方式,可以将实验点的辐照剂量率由不进行屏蔽时的 20 Gy/min 降低至 5 Gy/min (580 Gy/116 min)。

因此,控制电路抗辐射实验结果与采用该屏蔽罩对 Point Grey 公司的 Bumblebee2 双目相机和 Mesa Imaging 公司的 Swiss Ranger 4000 3D 激光测距相机构成的目标定位系统传感器进行抗辐射实验结果一致。

#### 6 结论

通过对摄像头、控制电路的抗辐射实验研究,

表明采用铅金属和铅玻璃结合构建抗辐射屏蔽体的防护方案可以实现强辐射环境下电子系统的保护。实验研究得出以下结论:

在 1.25 兆电子伏特能量级、21 万居里源活度的  $^{60}\text{Co}$  辐射环境下,目标定位系统中的摄像机和激光测距仪及其控制电路可以正常工作。目标定位系统中摄像机、单片机、晶闸管等器件的损坏主要是由辐照累计量决定的:摄像头损坏时累积辐照剂量约 340 Gy、单片机损坏时的辐照累积剂量约为 580 Gy,晶闸管损坏时的累积剂量为 1330 Gy。

采用铅砖与铅玻璃构建的屏蔽体对  $\gamma$  射线起

到较好的屏蔽作用,屏蔽效果与屏蔽材料的种类与厚度有关。摄像机在采用 40 mm 铅砖加 30 mm 铅玻璃时工作时间可延长了近 10 倍;单片机在采用 10 mm 铅砖时,其工作时间延长近 1 倍;采用 40 mm 铅砖加 30 mm 铅玻璃时,延长 4 倍。

根据以上研究结果,设计的目标定位系统屏蔽体可对双目相机和 3D 激光测距相机提供有效防护,在 1.25 兆电子伏特能量级、21 万居里源活度的  $^{60}\text{Co}$  辐射环境下,防护后工作时间可延长约 2 ~ 4 倍。

### 参 考 文 献

- [1] 童靖宇. 什么是极端环境[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 157-157.
- [2] 罗上庚,张振涛,张华. 核设施与辐射设施的退役[M]. 北京:中国环境科学出版社,2009.
- [3] 张力. 日本福岛核电站事故对安全科学的启示,中国安全科学学报[J]. 2011, 21(4): 3-6.
- [4] 阎昌琪,李洪喜. 核电站用机器人技术的发展[J]. 核动力工程,1994, 15(1): 29-33.
- [5] 冯彦君,华更新,刘淑芬. 航天电子抗辐射研究综述,宇航学报[J]. 2007, 28(5): 1071-1079.
- [6] 里基茨.L. W. 电子器件核加固基础[M]. 北京:国防工业出版社,1978.
- [7] 景涛. 电子与  $\gamma$  射线辐照损伤与抗核加固机理研究[J]. 中国核科技报告,2000, 01: 1-10.

## Research on Anti-Radiation Technique for Electronic System in the Radiation Environment

LIU Cheng-an<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>, LI Zhong-li<sup>2</sup>

(1. Laboratory for High Temperature & High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the development of nuclear industry, space exploration, as an important technical basis for the daily operation, maintenance, and emergency treatment, the target positioning technology in radiation environment is a lively research topic in high-tech research. Through studies on the anti-radiation properties of the camera and the control circuit by the experiments in the intense radiation environment from  $^{60}\text{Co}$ , it can be seen that the irradiation damage to the camera, the single-chip microcomputer, and the thyristor in the positioning system is mainly determined by the cumulative amount of radiation. By experimental test, a shield for the target positioning system was designed, the period of system's operation in the intense radiation environment can extend to 2 ~ 4 times.

**Key words:** intense radiation environment;  $^{60}\text{Co}$ ; radiation resistance reinforce; target positioning