

# 空间相机电磁防护与兼容设计

杨金宝<sup>1\*</sup>, 黄春蓉<sup>2</sup>, 杨曦<sup>2</sup>, 陈琳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>光学辐射重点实验室, 北京

<sup>2</sup>空军装备部驻北京地区军事代表局驻北京地区第一军事代表室, 北京

Email: \*yangjinbao20054723@126.com

收稿日期: 2021年3月13日; 录用日期: 2021年6月2日; 发布日期: 2021年6月11日

## 摘要

外层空间电磁环境复杂, 作为空间载荷的重要组成部分之一, 空间相机的设计要求高可靠性, 其中良好的电磁防护与兼容性不可或缺。本文从空间相机的实际场景出发, 分析了外层空间的电磁环境, 包括可能出现的外层空间电磁干扰、产品自身的电磁自兼容和对外电磁辐射及其影响, 针对性设计电磁防护与兼容措施, 定量分析产品的电磁防护与兼容性能, 最后通过产品实际设计和第三方检测, 验证了设计的正确性。

## 关键词

电磁, 防护, 兼容, 空间, 相机

# Electromagnetic Protection and Compatible Design of Space Camera

Jinbao Yang<sup>1\*</sup>, Chunrong Huang<sup>2</sup>, Xi Yang<sup>2</sup>, Lin Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing

<sup>2</sup>1<sup>st</sup> Military Representative Office, Military Representative Bureau, Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing

Email: \*yangjinbao20054723@126.com

Received: Mar. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2021; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The electromagnetic environment in outer space is complex. As one of the important components of space load, the design of space camera requires high reliability, among which good electromagnetic protection and compatibility are indispensable. Starting from the actual scene of space camera, the electromagnetic environment in outer space was analyzed in this paper, including possible electromagnetic interference in outer space, electromagnetic compatibility of products themselves and external electromagnetic radiation. Electromagnetic protection and compatibility

\*通讯作者。

measures were designed in this paper while electromagnetic protection and compatibility of products were quantitatively analyzed, and finally the correctness of the design was verified through actual product design and third-party testing.

## Keywords

Electromagnetic, Protection, Compatibility, Space, Camera

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

外层空间由于没有大气层防护,其电磁环境复杂,主要包括宇宙辐射、强爆炸特别是核爆炸产生电磁脉冲和自身电磁辐射与兼容等[1] [2]。

空间环境中包括地球捕获带电子和质子、太阳耀斑质子、宇宙线质子辐射等,其产生的总剂量效应会改变航天器的结构功能材料、电子元器件的物理性能,它使玻璃材料在严重辐照后会变黑变暗,透过率降低;热控材料发射率、吸收率变化;有机材料的物理性能和机械性能下降;半导体器件性能衰退等[3] [4]。

核电磁脉冲是核爆炸瞬间产生的一种强电磁波。它与自然界的雷电十分相似,其杀伤半径随爆炸高度升高而增大,核电磁脉冲的影响危害半径可达几千公里,它能消除计算机内储存的信息,使自动控制系统失灵,无线通讯受到干扰和损坏。核电磁脉冲影响和攻击电子设备的过程中,通过辐射耦合和传导耦合(这两种耦合往往是交杂在一起的)进行破坏和干扰电子设备,其表现形式为产生瞬态的高电压和高电流,进而损坏设备[5]。

空间相机在对宇宙辐射与核电磁脉冲的防护外,其自身的电磁兼容环境也极为重要,甚至为主要影响因素。电磁自兼容一方面能够减少自身对外界产品的辐射影响,如对北斗系统等导航信号的电磁干扰;一方面能够减少外部产品对自身的辐射影响,如电源注入干扰等[6] [7]。

因此,为保证空间相机工作可靠性,需要定量分析空间电磁环境并进行针对性设计,并按照 GJB151B 弹载光电产品的要求进行电磁兼容试验考核,如表 1 所示,通过实际实验数据验证其有效性[8] [9]。

**Table 1.** Electromagnetic compatibility requirements of space camera

**表 1.** 空间相机电磁兼容要求

代号	名称
CE102	10 kHz~10 MHz 电源线传导发射
CS101	25 Hz~150 kHz 电源线传导敏感度
CS112	静电放电敏感度
CS114	4k Hz~400 MHz 电缆束注入传导敏感度
CS115	电缆束注入脉冲激励传导敏感度
CS116	10 kHz~100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度
RE102	10 kHz~18 GHz 电场辐射发射
RS103	10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度
RS105	瞬态电磁场辐射敏感度(核电磁脉冲)

## 2. 相机组成

空间相机由光学镜头和 CMOS 成像器件组成，光学镜头实现场景和被观测目标的可见光成像，CMOS 成像器件对前端光学镜头聚焦于靶面的光信号进行光电转换，输出数字视频信号给信息处理单元，三维效果如图 1 所示。

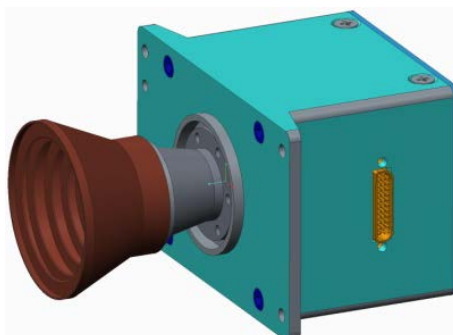


Figure 1. 3D model installation of space camera  
图 1. 空间相机三维模装图

空间相机外壳采用铝合金材料，结构件连接部分均采用齿口耦合设计，并涂抹导电胶以保证壳体电连续性。

镜头光学窗口外表面镀具有较低面电阻的 ITO 膜，保证在可见光光学波段具有较高光学透过率，且能够有效屏蔽该波段以外的其他干扰电磁波背景，从而提高相机自身电磁屏蔽能力。

CMOS 成像组件采用 27 V 供电，根据功能划分，在电路实现时使用三块电路板实现，分别为：成像板、信息处理板和电源板，如图 2 所示。



Figure 2. Physical circuit board  
图 2. PCB 实物

## 3. 空间电磁防护与设计

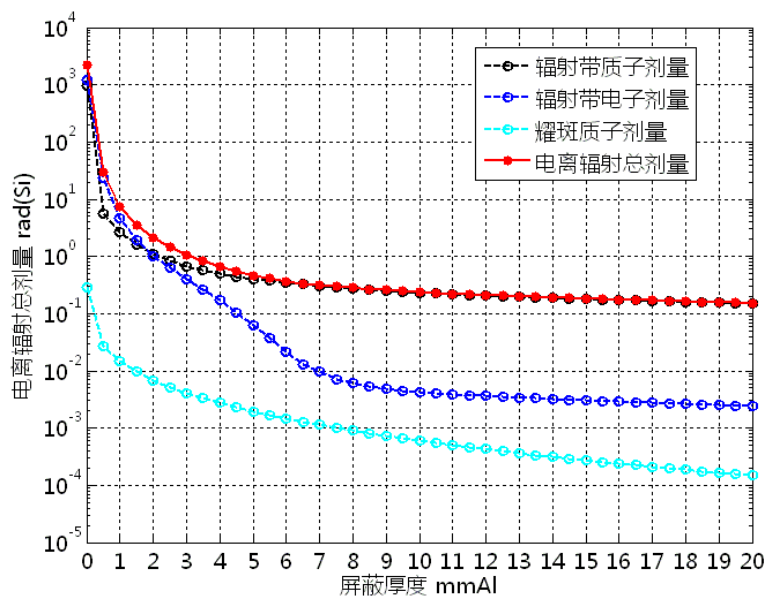
### 3.1. 空间宇宙辐射防护

#### 3.1.1. 防护设计

对于本文所设计的空间相机，其轨道主要位于地球内辐射带中，因此采用辐射带质子 AP8MAX 模型分析高能质子环境，采用辐射带电子 AE8MAX 模型分析高能电子环境，太阳耀斑质子环境选用 JPL 模型分析，且不考虑特大太阳耀斑爆发事件的发生[10] [11]。根据得到的高能粒子通量数据计算电离辐射总剂量与屏蔽厚度的关系，如表 2 所示，相应的曲线如图 3 所示。单位 mmAl 表示铝材料的屏蔽厚度，单位为毫米。

**Table 2.** Total dose depth data of ionizing radiation  
**表 2.** 电离辐射总剂量 - 深度数据

屏蔽厚度 <i>mmAl</i>	辐射带质子剂量 <i>rad(Si)</i>	辐射带电子剂量 <i>rad(Si)</i>	太阳耀斑质子剂量 <i>rad(Si)</i>	电离辐射总剂量 <i>rad(Si)</i>
0.0	9.72E + 02	1.22E + 03	2.89E - 01	2.19E + 03
0.5	5.63E + 00	2.38E + 01	2.75E - 02	2.95E + 01
1.0	2.62E + 00	4.63E + 00	1.46E - 02	7.26E + 00
1.5	1.57E + 00	1.92E + 00	9.56E - 03	3.50E + 00
2.0	1.08E + 00	1.03E + 00	6.85E - 03	2.12E + 00
2.5	8.22E - 01	6.30E - 01	5.19E - 03	1.46E + 00
3.0	6.67E - 01	4.00E - 01	4.07E - 03	1.07E + 00
3.5	5.65E - 01	2.59E - 01	3.29E - 03	8.27E - 01
4.0	4.93E - 01	1.70E - 01	2.73E - 03	6.66E - 01
4.5	4.42E - 01	1.06E - 01	2.29E - 03	5.50E - 01
5.0	4.05E - 01	6.11E - 02	1.95E - 03	4.68E - 01
5.5	3.73E - 01	3.68E - 02	1.69E - 03	4.11E - 01
6.0	3.47E - 01	2.16E - 02	1.47E - 03	3.70E - 01
6.5	3.24E - 01	1.28E - 02	1.29E - 03	3.38E - 01
7.0	3.06E - 01	9.81E - 03	1.14E - 03	3.17E - 01
7.5	2.89E - 01	7.06E - 03	1.01E - 03	2.97E - 01
8.0	2.75E - 01	6.09E - 03	9.03E - 04	2.82E - 01
8.5	2.62E - 01	5.46E - 03	8.12E - 04	2.68E - 01
9.0	2.52E - 01	4.88E - 03	7.34E - 04	2.58E - 01
9.5	2.41E - 01	4.54E - 03	6.64E - 04	2.46E - 01
10.0	2.34E - 01	4.33E - 03	6.04E - 04	2.39E - 01



**Figure 3.** Total dose depth curve of ionizing radiation  
**图 3.** 电离辐射总剂量 - 深度曲线

产品的外壳厚度设计为 3 mmAl，可以认为产品中所有器件的屏蔽厚度都至少为 3 mm 铝材料。查询分析结果表格可知，器件的电离辐射总剂量为 1.07 rad(Si)。该数值很小，根据经验数据，可以忽略电离辐射总剂量对产品性能的影响。

### 3.1.2. 设计验证

为进一步验证空间辐照剂量影响，对样机进行单机试验，由于要求的剂量相对较小，试验一起最小剂量为要求剂量的 5 倍，辐照过程中能够正常工作，试验场地如图 4 所示。

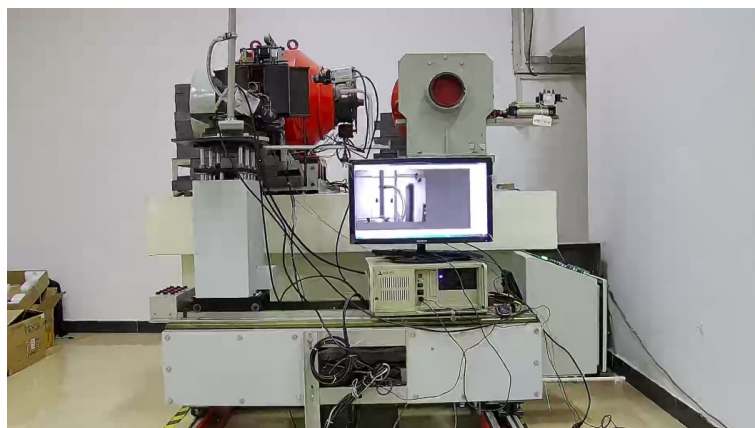


Figure 4. Irradiation test site  
图 4. 辐照试验场地

产品工作正常，5 倍剂量环境下，辐照过程中采集到的视频图像正常。

## 3.2. 核电磁脉冲防护

### 3.2.1. 防护设计

核电磁脉冲对电子设备的破坏作用一般可分为两类：功能损坏和工作干扰。核电磁脉冲对电子设备的破坏是电磁作用的结果，可以根据电磁原理采取必要的措施进行防护。

针对电磁脉冲的防护，采取了壳体屏蔽、滤波和电涌保护、接口及互连线、镜头镀膜等设计措施。

相机结构外壳材质为硬铝合金，设计厚度 3 mm。摄像单元的前端壳体与后盖连接处采用止口设计。观测信息处理单元上下端盖与电路板间的接合处加工有密封圈槽，用于安装导电密封圈。均具有良好的电磁密闭性，能够起到屏蔽外部电磁脉冲的作用。

针对 J30 连接器与设备面板的连接接缝，这类缝的面积与最大线度尺寸均不大，长度一般为 3 cm 左右，但由于在高频时导致连接器与机箱的接触阻抗急剧增大，从而使得屏蔽电缆的共模传导发射变大，往往导致整个设备的辐射发射出现超标，为此应采用导电橡胶等连接器导电衬垫。

镜头设计中，通过在光学窗口外表面镀具有较低面电阻的 ITO 膜，保证在可见光光学波段具有较高光学透过率，且能够有效屏蔽该波段以外的其他干扰电磁波背景，从而提高相机自身电磁屏蔽能力。

透明导电薄膜(ITO 膜)是一种半导体薄膜[12]，具有较低的电阻率(约为  $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ )可见光透过率可达 85% 以上，紫外线吸收率大于 85%。因其具有复折射率( $n-ik$ )在红外有大的  $k$  值，这种高  $k$  值使 ITO 膜在红外波处有高反射率，其对红外波反射率大于 80%，对微波衰减率大于 85%。而自由载流子的反射对长波、包括射频和雷达波造成衰减，而形成屏蔽。ITO 膜层硬度高、耐磨、耐化学腐蚀；采用电子束加热真空蒸镀的方法制备 ITO 膜，即利用高能电子束来轰击铟、锡氧化物混合料表面，使其升华，然后沉淀在衬底上形成 TIO 膜，这种方法可以制备出方块电阻较小，致使入射电磁波产生的吸收损耗和反射损耗

较大，因而屏蔽系数较大。

相机在 27 V 电源输入端加入滤波器和隔离型 DC/DC，对电源进行滤波处理，可以防止电磁脉冲通过电源对设备造成的影响。

同时，在 27 V 电源输入端加入瞬态电压抑制二极管，可以有效防止外部瞬间大电压对内部电路的损坏。

### 3.2.2. 设计验证

与传统产品相比，本次试验增加抗核电磁脉冲要求，整个设备除成像镜头光学玻璃外，均为金属封装，因此，最为薄弱的是光学玻璃。本次光学玻璃采用镀导电膜设计，将电磁脉冲能量衰减 30 dB 以上。为验证产品效能，进行抗核电磁脉冲摸底试验，试验在航天 203 所进行，结果如表 3 所示，实验现场如图 5 所示。

**Table 3.** Attenuation at different frequencies

**表 3.** 不同频率下的衰减情况

频率	参考值	衰减值	频率	参考值	衰减值
0.01	-0.09	-96.12	60	-1.41	-37.03
0.05	-0.29	-83.92	70	-1.52	-37.54
0.1	-0.33	-77.84	80	-1.67	-36.46
0.5	-0.27	-63.53	90	-1.61	-33.81
1	-0.22	-57.61	100	-1.65	-34.15
5	-0.40	-61.62	110	-1.68	-33.80
10	-0.52	-52.17	120	-1.69	-31.57
20	-0.77	-50.36	130	-1.67	-32.14
30	-1.24	-42.56	140	-1.82	-32.44
40	-1.22	-41.56	150	-1.88	-30.66
50	-1.26	-40.05			



**Figure 5.** Test device and site

**图 5.** 试验装置与现场

从试验可以看出，通过对光学玻璃增加金属镀膜设计，电磁脉冲能量衰减可达 30 dB 以上，满足相

关设计要求。

### 3.3. 电磁兼容性设计

#### 3.3.1. 频率兼容性设计

根据 RE102 试验在 1.54 GHz~1.62 GHz 和 5.2 GHz~6.21 GHz 频段有下凹要求,分析空间相机各电路工作频率情况。电路板上尽量选择较低频率的晶振,晶振频率有 50 MHz、25 MHz、22.579 MHz 和 20 MHz, DSP 内部倍频后工作频率为 600 MHz, SDRAM 工作频率 100 MHz, 对外通讯接口速率为 2 MHz 和 1.5 MHz, 串行视频时钟频率为 60 MHz。以上频率中, 600 MHz 在 1.54 GHz~1.62 GHz 和 5.2 GHz~6.21 GHz 频段内没有高次谐波, 50 MHz、2 MHz 和 1.5MHz 通信接口时钟不会对此频段有影响; 25 MHz、22.579 和 20 MHz 在此频段的高次谐波倍数均在 61 以上, 能量很小, 基本没有影响; 100MHz 在两个频段内高次谐波倍数分别为 16 和 60, 60 MHz 在两个频段内高次谐波倍数大于 26 和 87, 通过高速布线和铺地保护可以有效减少时钟对外辐射。视频信号时钟 1.44 GHz 的 4 次谐波在 5.2 GHz~6.21 GHz 频段内, 采取差分线缆对几屏蔽加电缆外屏蔽, 以及接插件尾端良好屏蔽处理和接地等措施减小其对外辐射影响。

CE102 为电源线传导发射试验, 目的为检验设备内部的干扰频率是否会通过电源线和地线对外进行发射。针对 CE102 试验的设计措施包括两种: 滤波连接器和 EMI 滤波器。单元结构件上的对外连接器采用带滤波的 J30J, 可以保证滤波功能位于最靠近电源输入端的连接器上, 这种方式为对电源滤波最理想的设计方式, 可对减少电路中的串扰频率和结构内部空间的串扰频率。此外, 在电源进入到电源接口板上, 设计有一个 EMI 电源滤波器模块, 可对后级隔离电源的开关频率和处理板串扰到电源上的频率进行抑制。

CS101 为电源线传导敏感度试验, 目的为检验设备在电源线上加入干扰时, 设备工作是否正常。设计和解决方法同 CE102 的设计方式。

CS112 为静电放电敏感度试验, 当给设备信号端口静电时, 检验设备是否会因为静电导致损坏。设计在所有的连接器信号(包括电源、RS485、Cameralink)均具备防静电能力, 电源进入电源芯片和模块, 本身具备防静电能力, RS485 接口芯片具备防静电能力, 同时增加了总线的 ESD 器件, Cameralink 收发芯片也具备防静电能力, 因此 CS112 试验并不会对设备造成损坏。

CS114 为电缆束注入传导敏感度试验, 在于检查射频信号耦合到电缆束上时设备的敏感度。空间相机为纯数字功能产品, 无射频和天线部分, 对外连接的信号主要包括 28 V 电源、5 V 电源、RS485、RS422 和 Cameralink 信号, 这些电源和数字信号对射频耦合信号并不敏感, 因此此项试验无风险。

CS115 为电缆束注入脉冲激励传导敏感度, 设计方法同 CS114。

CS116 为电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度, 设计方法同 CE102。

RS103 为电场辐射敏感度, 设计方法同 CS114。

#### 3.3.2. 屏蔽性设计

每块电路板之间都有安装有导电密封条。调试口及接插件安装口都有定制的导电橡胶垫。保证各接缝处的密封效果[13]。

镜头设计中, 通过在光学窗口外表面镀具有较低面电阻的 ITO 膜, 保证在可见光光学波段具有较高光学透过率, 且能够有效屏蔽该波段以外的其他干扰电磁波背景, 从而提高相机自身电磁屏蔽能力。

针对空间相机规避北斗导航频段, 采取了合理的接地和屏蔽措施, 具体措施如下:

a) FPGA 和 DSP 底部和周围布局大面积地平面, 吸收器件的频率辐射[14] [15];

b) 器件上表面设置金属散热板, 金属散热板对频率辐射具有一定的反射作用, 绝大部分辐射反射回电路板地平面;

- c) 整机外壳所有接缝处均采取导电密封条进行电磁密封处理;
- d) 对所有晶振均设计金属屏蔽罩进行密封, 最大程度上减少晶振的辐射能量;
- e) 晶振电源输入端采用滤波器滤波;
- f) 在电源和信号线的连接器端均加有滤波器件对向外辐射的频率进行过滤。

#### 4. 实验验证

为进一步验证设计的正确性, 对研制的空间相机开展第三方电磁兼容性试验, 在 9 项试验中, 产品工作正常, 满足技术要求, 如图 6 是 CE102 和 RE102 的第三方测试结果。图 7 是所有电磁兼容试验项第三方检测评估结果, 所有试验项全部通过。

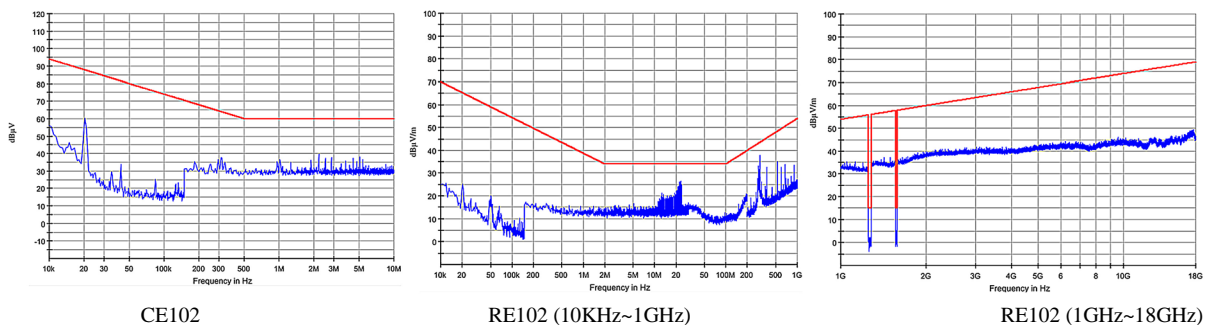


Figure 6. Actual measurement of products (CE102 和 RE102)  
图 6. 产品实测图(CE102 和 RE102)

试验结果				
序号	试验依据	试验项目	适用平台/设备类别	试验结果
1	GJB 151B-2013; 《观测组合电磁兼容性试验 大纲》	CE102	空间系统	合格
2		CS101		合格
3		CS112		合格
4		CS114		合格
5		CS115		合格
6		CS116		合格
7		RE102		合格
8		RS103		合格
试验结论				
CE102、CS101、CS112、CS114 等共 8 项试验依据 GJB 151B-2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》标准和《观测组合电磁兼容性试验大纲》进行试验, 测试结果合格。				
四、检测数据				
校准场强 kV/m	次数	校准波形	检测结果	
5	5	图 RS105-1	不敏感	

Figure 7. Third party test assessment  
图 7. 第三方试验考核



## 5. 结论

本文对空间相机的电磁防护与兼容设计进行了系统性分析,从宇宙空间电磁辐射、核电磁脉冲、自身电磁兼容三方面对空间相机的防护与兼容进行针对性的设计并提出了相应的设计措施,包括电路和结构设计均采取了频率、屏蔽、接地、滤波等。实验摸底和第三方试验结果表明,本文设计正确,所设计的空间相机电磁防护与兼容性能良好,能够满足使用方提出的全部 9 项性能要求,在实际空间载荷设计与应用中有广泛的参考价值。

## 基金项目

航天自主创新基金(110000317FSKY01)。

## 参考文献

- [1] 沈自才, 闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 229-240.
- [2] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 1-3.
- [3] 李璟璟, 邵思霏, 刘泳, 张玉兔, 王月, 王世金. 空间辐射效应监视分析与应用系统研究[J]. 空间电子技术, 2015, 12(4): 92-96.
- [4] 韩虹, 王子玉, 钟兴旺. 空间环境对飞行器的影响[J]. 空间电子技术, 2011, 8(1): 1-5, 14.
- [5] 夏彦, 孙韶蕾, 杨艳斌, 赵春晴, 徐飞, 何世熠, 等. 空间核爆对地面与航天活动的影响[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(1): 12-16.
- [6] 宋健, 贺庚贤, 葛欣宏. 空间光学有效载荷电磁兼容故障诊断[J]. 现代电子技术, 2018, 41(6): 74-78.
- [7] 黄成, 夏军, 刘成汉, 叶达. 高速 IC 测试系统的信号完整性设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 84-87.
- [8] 杨玲玲, 孙海燕. 高速 IC 封装的电源完整性分析与设计[J]. 电子世界, 2018(23): 207.
- [9] 陈世钢. GJB 151B-2013 解析[J]. 标准与应用, 2014(2):15-24, 69.
- [10] 府宇. 近地空间辐射环境与空间电导率研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [11] (美)特里布尔. 空间环境[M]. 唐贤明, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [12] 赵文秀, 周奕华, 钱俊. 基于印刷电子的透明导电薄膜研究进展[J]. 影像科学与光化学, 2015, 33(3): 251-263.
- [13] 侯扬, 李伟. 电子设备机箱的电磁屏蔽结构设计及仿真[J]. 光电技术应用, 2018, 33(2): 59-62.
- [14] 孙旭, 李富栋, 吴涛, 梁宏光. 印制板的抗干扰设计[J]. 光电技术应用, 2007, 22(4): 81-84.
- [15] 刘忠武, 杨萌. EMC 电磁兼容电路设计[J]. 科学与财富, 2018(21): 22.