

# 空间有效载荷电磁兼容设计

EMC Design for Space Payload

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 王小朋 于平 李东景 齐心达

## 摘要

结合实际案例中的电磁兼容问题,有针对性地采取了软启动设计、DC/DC 及滤波设计、PCB 设计与屏蔽设计等措施。结果表明:浪涌电流减少至原来的 1/20,输出纹波减少至原来的 1/3,通过对载荷的输出电源线传导发射测试和二次电源机箱的辐射发射测试,其测量值均满足相关标准的要求。

## 关键词

有效载荷;DC 模块;滤波器;电磁兼容

## Abstract

Combined with the EMC problem in actual research of a space payload, some countermeasures were adopted pertinently, including soft start, DC/DC transformation, filtering, PCB and shielding design. The results showed that the surge current decreased to 1/20, the output ripple decreased to 1/3. The RE and CE test results could meet the requirements of relevant national military standard.

## Keywords

payload;DC/DC module;filter;EMC

## 1 空间有效载荷电磁干扰源

某型号空间有效载荷(以下简称载荷)是集光学、光谱学、精密机械、电子技术及计算机技术于一体的新型空间遥感器,由光学系统、电子学系统和机械结构等组成。电子学系统是控制核心,主要包括 CCD 驱动电路、信号处理电路、编码器电路、通信电路及二次电源等。

在该载荷系统中,由直流+100 V 母线向包括本载荷在内的多个子系统供电,由于航天供电系统工作状态较复杂及各子系统之间的相互影响,+100 V 母线具有不稳定性,会引入一定的干扰,而载荷二次电源在直流变换过程中也容易形成开关噪声,产生严重的传导干扰和辐射干扰。

## 2 空间有效载荷电磁兼容设计

### 2.1 浪涌抑制设计

本设计中使用的软启动电路原理如图 1 所示。

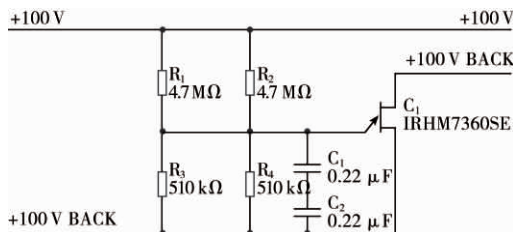


图 1 软启动电路

$Q_1$  为 IR 公司的功率场效应管 IRHM7360SE,其栅极电压  $V_g$  为电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压。

$$V_g = \frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt \quad (1)$$

母线+100 V 加电后,电容  $C_1$ 、 $C_2$  由电阻  $R_1$ 、 $R_2$  限流充电,最大充电电流  $I_{max} = 100 V / 2.35 M\Omega = 0.042 mA$ ,  $V_g$  由 0 V 逐渐上升,  $Q_1$  的导通电阻下降,当电容电压上升到一定时(10 V 左右),  $Q_1$  由截止状态逐渐变为导通状态,即+100 V 回线接通,从而实现二次电源系统+100 V 的软启动,起到抑制浪涌电流与电磁干扰的效果。由表 1 可知,IRHM7360SE 导通电阻为 0.22  $\Omega$ ,1 A 电流输入时功耗仅为 0.22 W,对整个二次电源的效率没有太大影响。

表 1 功率场效应管 IRHM7360SE 的参数指标

元件编号	辐射水平	$R_{DS(ON)}$	$I_D$	$BV_{DSS}$
IRHM7360SE	$1 \times 10^6 Gy$	0.22 $\Omega$	22 A	400 V

由于 IRHM7360SE 不需要太大电流来驱动栅极,所以  $R_1$ 、 $R_2$  选取 4.7 M $\Omega$ ,电容  $C_1$ 、 $C_2$  的容值可选 0.22  $\mu F$ ,采取电阻并联、电容串联的方式从而提高电路设计的可靠性,此方案可由 RC 来控制电容的充电速度即软启动的时间。如果为进一步提高可靠性,还可采用两组软启动电路并联使用的方式。

软启动技术的应用不仅能有效抑制浪涌电流,而且有助于降低电磁干扰,可以减小功率电路中功率器件的  $di/dt$  和  $dv/dt$ ,从而减小 EMI 电平。

在空间有效载荷中,可采用母线中串联电感与软启动电路两种方式来抑制浪涌。经过对上述软启动电路和电感进行试验对比,发现未加任何措施时实测浪涌峰值约为 94 A,使用软启动电路时实测浪涌峰值为 4.6 A,串联电感时实测浪涌峰值 62 A。由此可见,软启动电路虽

然相对较复杂,但其抑制浪涌的效果远远好于串联电感的方式。

## 2.2 DC/DC 模块电磁兼容设计

所有 DC/DC 模块都有由电感和电容组成的 LC 输入和输出滤波网络,这些 LC 器件在接入正常工作的带电系统时,都会因瞬时充放电而对电源产生影响。因此,需要综合考虑 DC/DC 模块的抗干扰设计。

### 2.2.1 输入电路

在本设计中,根据二次电源的需求,依据可靠性与降额设计的原则,在+100 V 输入滤波器选用了 IR 公司的 AME270461X 滤波器,+28 V 输入滤波器采用 INTER-POINT 公司的 FMC-461 滤波器,这两种滤波器主要由共模扼流圈、跨接线路电容以及线路高通滤波电容组成,其原理如图 2 所示。

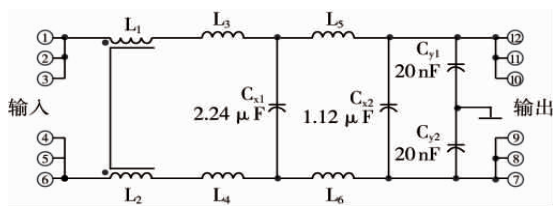


图 2 输入滤波电路

其中 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、C<sub>y1</sub>、C<sub>y2</sub> 用于滤除共模干扰信号。L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub> 磁芯面积不宜太小,以免饱和,电感量几毫亨至几十毫亨。C<sub>y1</sub>、C<sub>y2</sub> 又称 Y 电容,要求容量在 20 nF 左右,容量过大,将影响设备的绝缘性能。L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub>、L<sub>6</sub>、C<sub>x1</sub> 及 C<sub>x2</sub> 用于滤除差模干扰信号。L<sub>3</sub> 与 L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub> 与 L<sub>6</sub> 圈数相同,电感量一般在几十至几百微亨左右。C<sub>x1</sub>、C<sub>x2</sub> 为 X 电容,一般用陶瓷电容或聚脂薄膜电容,容量分别取 2.24 μF 与 1.12 μF。

上述滤波器电路专门用于抑制线路噪声对 DC/DC 模块性能的干扰,提供 EMI 滤波和瞬态噪声抑制,降低 DC/DC 模块输入线路反射纹波电流,同时阻止二次电源向输入电源反馈的噪声。

### 2.2.2 输出电路

二次电源的输出高频噪声(表现为纹波)可能向空间辐射成为辐射噪声,过大时可能使电子设备出现故障。为此,在 DC/DC 模块的输出端,需要使用共模扼流圈及高频电容以减少电源的纹波,提高输出电源的稳定性。

扼流圈的电感量一般由所要抑制的噪声电平下限频率(DC/DC 模块的基波频率)确定,下限频率越高,所需要的电感量越小;本设计中采用的 DC/DC 模块基波频率为 600 kHz,根据实际使用经验,选取电感量值约为 500 mH,依据负载电流大小,选用锰铁磁环,其导磁率高,固有阻抗低,可以防止磁环饱和而影响扼流圈效果。

绕制时尽量减小匝间分布电容及绕线头尾之间的分布电容,以减小高频噪声的耦合电容,否则起不到抑制作

用,扼流圈的电感与匝数的关系如下:

$$L = \frac{4\pi\mu AN^2 10^{-7}}{l} \quad (2)$$

式中 L 是扼流圈电感量,单位为 H;A 是磁环截面积,单位为 m<sup>2</sup>;μ 是磁环的磁导率;N 是绕线匝数;l 是平均每圈周长,单位为 m。

输出滤波电容的耐压一般以大于额定输出电压的 2 倍为宜。电容的容量与负载额定功率、要求的输出纹波大小有关,最小容量可由以下公式估算:

$$C = 10 \times [P_{\text{额定}} \times \Delta V_{\text{纹波峰-峰}} / V_{\text{输出}}] \quad (3)$$

在载荷二次电源输出回路中使用了共模扼流圈及高频电容进行滤波后,实测电源输出纹波值由原来的 200 mV 下降至 70 mV,满足设计任务提出的纹波小于 100 mV 的要求。

## 2.3 PCB 与线缆

印制板的元器件布置和线缆设计对电源的 EMC 性能有极大的影响,在载荷系统中,由于印制板上既有低压电源线,又有高压电源母线,同时还有一些功率开关、磁性元件,如何在印制板有限的空间内合理地安排元器件和走线位置,将直接影响到电路工作的可靠性与抗干扰性能。

### 2.3.1 PCB 设计

在 PCB 设计中,根据印制板的安装方式,把易发热的元器件如 DC/DC、滤波器、功率场效应管等安装在印制板的上方,以利于散热;尽量将相互关联的元器件摆放在一起,以避免因器件距离远造成印制线过长所带来的干扰,将输入信号和输出信号尽量放置在引线端口附近,以避免因耦合路径而产生的干扰。

### 2.3.2 线缆设计

在载荷线缆的设计上,尽可能使用双绞线,使电源线与其返回线、信号线与其返回线相绞合,避免信号线和电源线处在同一电缆中或相互靠近。双绞线对磁场干扰的屏蔽效果十分明显,除了对低频信号提供良好的磁场屏蔽之外,同时还能提供很好的电场屏蔽和电磁屏蔽,因此,在低频段,双绞屏蔽线的电场、磁场和电磁屏蔽效果都是最好的。

部分电缆设计有屏蔽层,电缆两边的屏蔽层一直延伸到连接器内部并与机壳相连,并且信号线和回线一起屏蔽。尽可能使用带屏蔽尾罩的电连接器,减少屏蔽线与连接器连接处的电磁泄漏。

## 2.4 电箱屏蔽设计

载荷的干扰频谱集中在高频段,干扰信号主要是辐射场,它以平面电磁波形式向外辐射电磁场能量,可以用导电良好的材料对电场屏蔽。本载荷使用合金电箱及合金 PCB 板框,PCB 板首先安装到板框上,然后将板框通过滑轨放置在电箱内,一方面是加强机械强度,另一方面合金框与电箱也大大提高了电路的电磁兼容性。根据设

计经验,电箱外壳最小壁厚不小于 2 mm 即可有效起到电磁屏蔽的作用。

电箱合金材料的选择,一方面要考虑所选材料的屏蔽性能,另一方面,也要考虑航天系统轻量化设计的要求。经综合考虑,本设计采用镁合金材料,并且在加工中要求板框和面板之间接触面表面粗糙度优于 1.6,平面度优于 0.03,以保证接触紧密可靠,减少缝隙带来的电磁泄漏。

二次电源中采用的 DC/DC 及滤波器模块,属于对辐射及感应干扰比较集中的关键元器件,我们将其紧密安装在与电箱一体的金属面板上,一方面可以起到热传导的作用,另一方面金属板连接至机壳进而接到系统的地上,可起到较强的屏蔽作用。

### 3 电磁兼容试验结果

在进行了上述电磁兼容设计后,本载荷在标准 EMC 试验室进行了 10 kHz~18 GHz 电场辐射发射(RE102)及电源线传导发射测试(CE101、CE102),测试结果如图 3、图 4 所示。可以看到,实测曲线均在极限曲线下方,满足 GJB 151A-1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》的要求。

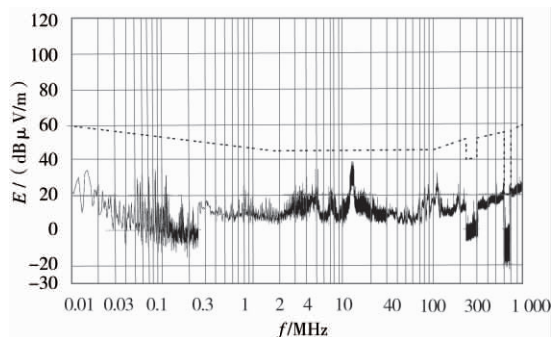


图 3 电磁兼容电场环境测试曲线 1(10 kHz~1 GHz)

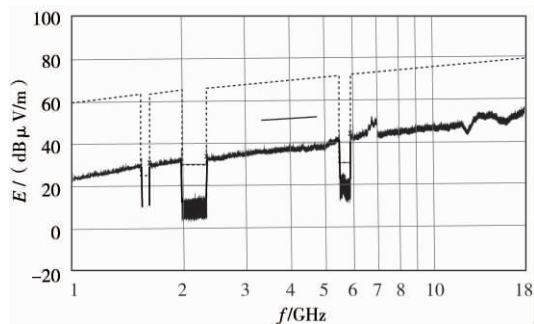


图 4 电磁兼容电场环境测试曲线 2(1~18 GHz)

### 4 结语

实验及工程应用表明,文中所提供的几种电磁干扰抑制方案具有良好的效果,对空间载荷的稳定性及技术指标的实有至关重要的作用,上述方案可以单独使用,也可以根据不同情况组合使用。

### 参考文献

- [1] 罗宇翔,汪开龙,谢军. 卫星有效载荷系统的电磁敏感度测量[J].空间电子技术,1999(1):24-28.
- [2] 曲学基,王增福,曲敬铠.稳定电源电路设计手册[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 王庆斌.电磁干扰与电磁兼容技术[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [4] 黄大庆,李勃.无人机电磁兼容传导与辐射测试项目剪裁法[J].光学精密工程,2009,17(2):380-387.
- [5] 李希茜.开关电源的抗干扰设计[J].电源技术应用,2002(6):31-33.
- [6] 孟晓玲,郭陈江.电子设备的电磁兼容设计[J].航空兵器,2005(4):27-29.
- [7] 徐拓奇,金光.星上电池的均衡控制[J].光学精密工程,2009(2):380-387.
- [8] 丛梦龙,李黎.控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J].光学精密工程,2010(7):1629-1636.
- [9] 余幼平.金属结构机箱电磁兼容性工艺处理方法[J].安全与电磁兼容,1997(3):14-18.

编辑 王淑华 E-mail:wangsh@cesi.ac.cn

**宏业电化股份有限公司**  
**MAGNET Industry Ltd.**

**铁氧体磁砖**  
**FERRITE ABSORBER TILES**

Since 1973

**宏业续写历史 历史铸就宏业**

Other Products

EMI/RFI

Inductors

Web site:<http://www.ferrite.com.tw>

**宏业电化股份有限公司**  
**MAGNET Industry Ltd.**  
 台湾省台北市南京东路3段223巷10号2楼  
 2F, No.10, Lane 223, Sec. 3, Nan-Jing East Road,  
 Taipei, Taiwan.  
 TEL: 886-2-25149690  
 FAX: 886-2-2514-9145  
 E-mail: [magnet@ferrite.com.tw](mailto:magnet@ferrite.com.tw)

**宏业电化(江阴)有限公司**  
**MAGNET Jiang-Yin (China)**  
 江苏省江阴市申港镇澄路1201号(于门桥工业园区)  
 No.1201, Zhen-Cheng Rd, ShenGang Town,  
 Jiang-Yin, Jiang-Su, Prov. China  
 TEL: 86-510-86685030  
 FAX: 86-510-86685025  
 Website: 13526236898

广告编号: 2010-04-15