

文章编号: 1672-2892(2011)04-0439-05

## 空间有效载荷二次电源抗干扰设计

王小朋, 于平, 李东景

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为解决电源干扰问题, 本文结合某型号空间有效载荷的研制, 就其二次电源的抗干扰设计展开讨论, 有针对性地将多种抗干扰措施例如: 软启动、DC/DC 及滤波设计、PCB 与机箱电磁兼容设计等结合起来。综合采取上述措施后, 浪涌电流减少至原来的 1/20, 输出纹波减少至原来的 1/3, 通过对二次电源的输出电源线传导发射测试和辐射发射测试, 发现其测量值均低于国军标(GJB 151A-97)中规定的极限值。实验结果和工程实际应用表明, 该抗干扰设计方案具有良好的实际效果。

**关键词:** 有效载荷; 软启动; DC/DC 转换器; 纹波; 电磁兼容

**中图分类号:** TN03

**文献标识码:** A

## Anti-interference design for secondary power on space payload

WANG Xiao-peng, YU Ping, LI Dong-jing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun Jilin 130033, China)

**Abstract:** There will be various interference noises when DC transforms in Space Payload. These noises can generate severe conducted interference and radiated interference, then influence the quality of power supply directly. In order to solve this problem, this paper discusses the anti-interference design of the secondary power system combined with the research of a space payload, including soft start, DC filter, Printed Circuit Board(PCB) and the case of Electro Magnetic Compatibility(EMC) design. After taking this measures, the surge current drops to 1/20, and the output ripple drops to 1/3. The measured data of the Conduction Emission(CE) and Radiation Emission(RE) test in the EMC are under the limitation of GJB 151A-97. All the results of the experiment and actual application show that the anti-interference design is effective.

**Key words:** payload; soft start; DC/DC converter; ripple; Electro Magnetic Compatibility

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(Charge Coupled Device)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。其中二次电源系统是电子学系统中最基础、最重要的一环, 电源系统的稳定性与质量高低直接影响整个载荷系统运行的可靠性与性能指标的实现<sup>[1]</sup>。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各种干扰噪声, 产生严重的传导干扰和辐射干扰, 必须在二次电源设计中采取适当的处理措施, 否则产生的电磁干扰对二次电源本身及周围电子设备的正常工作都将造成威胁。因此, 展开对有效载荷二次电源抗干扰设计的讨论具有十分重要的意义。

### 1 二次电源组成原理

空间有效载荷电子学系统中需要的电源是+5 V,+12 V,+28 V和±15 V等, 母线电源为直流+100 V。设计要求在满足任务需求的前提下, 尽量采用成熟技术, 保证高可靠性。

DC模块电源是利用先进的制造工艺构成的一个整体的、结构紧凑的、体积小的高质量稳压电源, 使用简单,

收稿日期: 2010-08-25; 修回日期: 2010-10-12

构成系统时具有扩容方便、可靠性高、维修性好等优点，因此广泛用于航空航天等领域。

基于此，在分析了国内外航天器供电系统设计现状的基础上，针对载荷的实际情况，采用二次电源变换的方式供电。即首先使用大功率+100 V~+28 V DC/DC电源模块将母线+100 V变换成+28 V，再使用多块+28 V输入的电源模块变换出所需要的各种电源。二次电源采用主辅两路冷备设计，主要包括熔断器电路、软启动电路、滤波器电路、DC/DC变换电路及驱动控制电路等，其原理框图如图1所示。

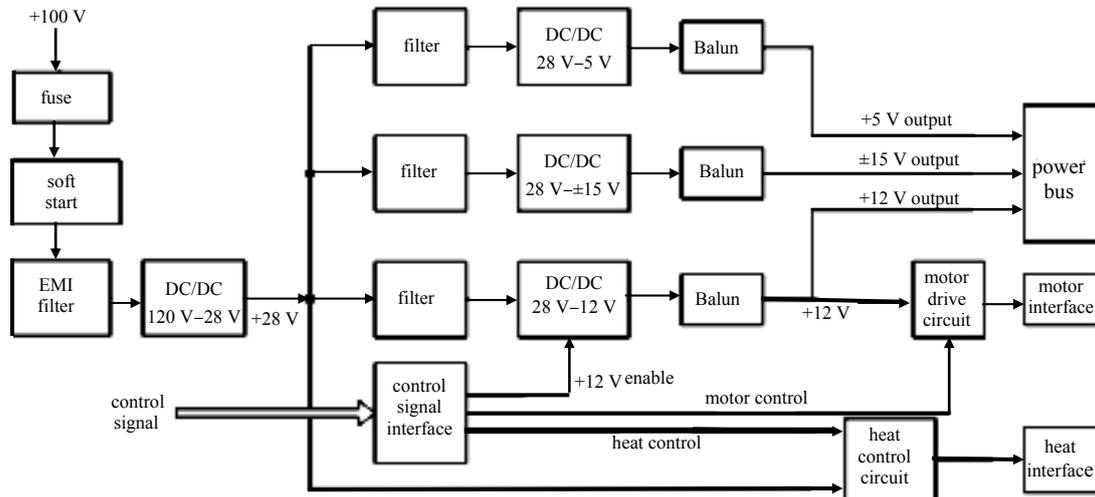


Fig. 1 Scheme of secondary power  
图1 二次电源原理框图

## 2 二次电源系统抗干扰设计

### 2.1 软启动电路

在电源上电瞬间，会有很大的冲击电流，称为浪涌电流。浪涌电流会给电源系统带来极大的不利影响，各种电源变换模块和滤波器模块等都有一定的容量限制，当冲击电流超出模块额定容量较多时，就会使电源系统不能正常工作，因此必须采取措施降低浪涌电流的幅度。

在航天产品中，可采用母线中串联电感与软启动电路2种方式来抑制浪涌，经过对这2种方式的实际试验与效果对比发现：未加任何措施时实测浪涌峰值为94 A左右，使用软启动电路时实测浪涌峰值为4.7 A(如图3所示)，串联电感时实测浪涌峰值为62 A。

软启动电路的特点是抑制效果好，缺点是器件的选择上需要根据负载的情况试验确定。特别是功率场效应管的选择及场效应管与分压电阻、电容大小的匹配上，需要反复调整，才能根据实测波形确定一个相对的最优值。根据2种方式试验对比的结果，二次电源最终采用软启动电路来抑制浪涌电流，其电路原理图如图2所示。

本设计中使用的软启动电路原理如下： $Q_1$ 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：

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

+100 V母线上电后，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(约10 V)， $Q_1$ 由截止状态逐渐变为导通状态，+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

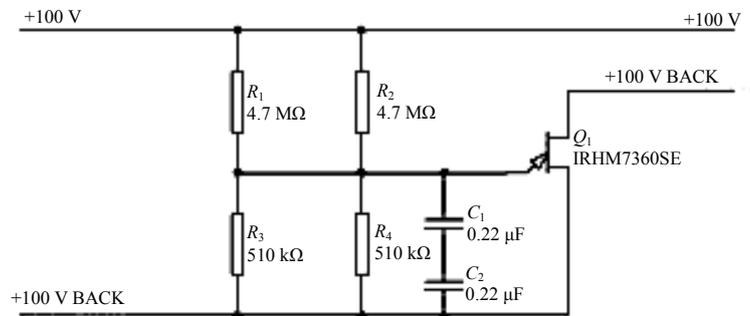


Fig. 2 Soft start circuit  
图2 软启动电路

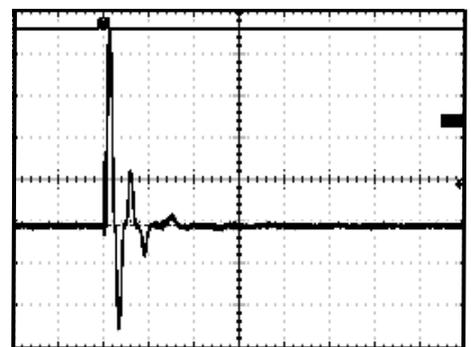


Fig. 3 Actual inrush wave after soft start  
图3 使用软启动后实测浪涌波形

流与电磁干扰的效果。由表1可知, IRHM7360SE导通电阻为0.22 Ω, 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。

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 MΩ, 电容 $C_1, C_2$ 的容值可选0.22 μF, 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, 此方案可由电阻与电容值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2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, 而且有助于电磁干扰的降低, 可以减小功率电路中功率器件的 $dI/dt$ 和 $dU/dt$ , 从而可以减小EMI(Electro Magnetic Interference)电平。

### 2.2 DC/DC模块抗干扰设计

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<sup>[2-4]</sup>。因此, 需要综合考虑DC/DC模块的抗干扰设计。

#### 2.2.1 输入滤波

DC/DC 模块一般先把直流转换为高频交流, 再把高频交流转换为直流, 转换过程中容易形成各种噪声, 在输入端表现为传导噪声和辐射噪声。

滤波是一种抑制传导干扰的方法。在电源输入端接上滤波器, 可以抑制来自电源的噪声对电源本身的侵害, 也可以抑制由电源产生, 并向电网反馈的干扰; 同时对传输线上的辐射发射也具有显著的抑制效果。

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INTERPOINT公司的FMC-461滤波器, 这2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4所示, 其中 $L_1, L_2, C_{Y1}, C_{Y2}$ 用于滤除共模干扰信号。 $L_1, L_2$ 磁芯面积不宜太小, 以免饱和, 电感量几毫亨至几十毫亨。 $C_{Y1}, C_{Y2}$ 为旁路电容, 又称Y电容。电容量要求20 nF左右。电容量过大, 将影响设备的绝缘性能。 $L_3, L_4, L_5, L_6, C_{X1}$ 及 $C_{X2}$ 用于滤除差模干扰信号。 $L_3$ 与 $L_4, L_5$ 与 $L_6$ 圈数相同, 电感量一般在几十至几百微亨左右。 $C_{X1}, C_{X2}$ 为电源跨接电容, 又称X电容, 一般用陶瓷电容或聚脂薄膜电容, 电容量分别取2.24 μF与1.12 μF。

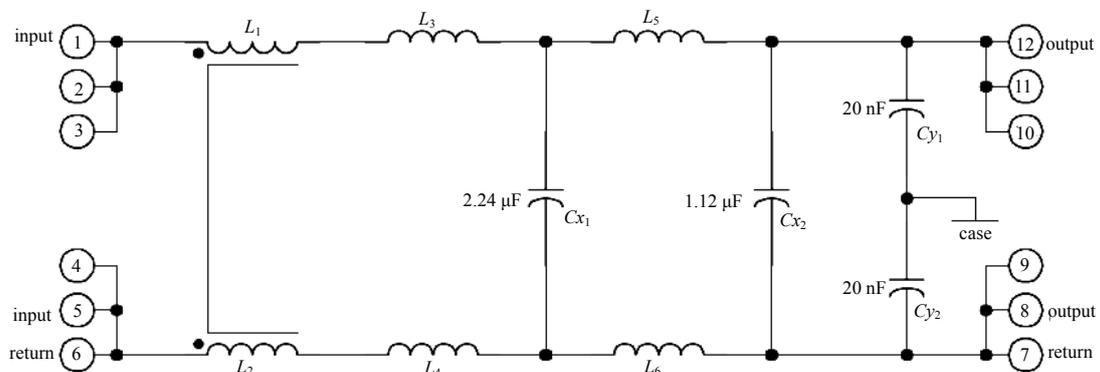


Fig.4 Input filter  
图4 输入滤波电路

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 输出纹波抑制

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, 过大时造成作为负载的电子设备出现故障。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。

共模扼流圈又称为Balun, 是平衡-非平衡滤波器的简称, 它由漆包线绕在软磁铁氧体磁环上构成, 其示意图如图5(a)所示, 实物图如图5(b)所示。扼流

表1 功率场效应管IRHM7360SE参数指标  
Table1 Parameters of IRHM7360SE

part number	radiation level	$R_{DS(ON)}$	$I_D$	$BV_{DSS}$
IRHM7360SE	100 Kads(Si)	0.22 Ω	22 A	400 V

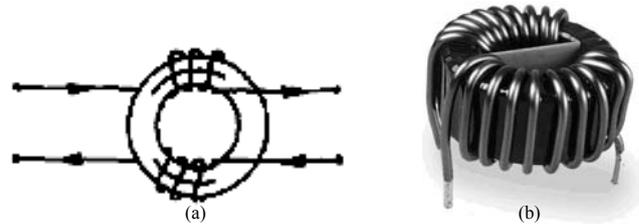


Fig.5 Double Balun sketch  
图5 双路 Balun 示意与实物图

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, 根据计算实际选取电感量值约为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, 可以防止磁环饱和和影响扼流圈效果。

在绕制扼流圈时, 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<sup>[5]</sup>如式(2)所示:

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

式中:  $L$ 为扼流圈电感量;  $A$ 为磁环截面积;  $\mu$ 为磁环的磁导率;  $N$ 为绕线匝数;  $l$ 为平均每圈周长。

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, 最小容量可由式(3)估算:

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

所测量的纹波中含有高频分量, 必须使用特殊的测量技术, 才能获得正确的测量结果。为了测出纹波尖峰中的所有高频谐波, 一般要用20 MHz带宽的示波器。其次在进行纹波测量时, 必须非常注意, 防止将错误信号引入检测设备中。因为在一个高频辐射场中, 地线夹会象一个天线一样接收噪音, 干扰测量结果, 测量时必须去掉探头地线夹。本设计中, 采用50  $\Omega$  同轴电缆来测量输出纹波电压的方法如图6所示。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(见图7)由原来的200 mV下降至70 mV左右, 满足设计任务提出的纹波小于100 mV的要求。

### 2.2.3 屏蔽设计

载荷二次电源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。因此, 二次电源中采用的DC/DC及滤波器模块, 均紧密安装在与板框或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, 可以对辐射及感应干扰比较集中的DC/DC及滤波器模块附近的电场起到较强的屏蔽作用。

### 2.3 PCB设计

在PCB设计中, 电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构, 对特定频率的电磁波具有带阻特性, 能有效地抑制阻带范围内的电磁波, 可以用于抑制电磁干扰, 在具体设计中, 可以通过控制电源层、地层、中间层的材质与厚度实现不同介质、金属以及混合体单元按周期性排列的EBG结构<sup>[6]</sup>。

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部位, 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。

通过分析印制导线的特性阻抗, 来选取印制导线的放置方式、长度、宽度以及布局方式。单根导线的特性阻抗由直流电阻和自感 $L$ 组成<sup>[7]</sup>:

$$Z = R + j\omega L \quad (4)$$

$$L = 2 \ln\left(\frac{2l}{b} + \frac{l}{2}\right) \quad (5)$$

式中:  $l$ 为导线长度;  $b$ 为导线宽度;  $\omega$ 为角频率, 由导线所经信号的频率决定。

从式(6)中可看出, 印制线越短, 越宽, 直流电阻就越小, 自感 $L$ 就越小; 另外, 还要尽量增大线间距以减少

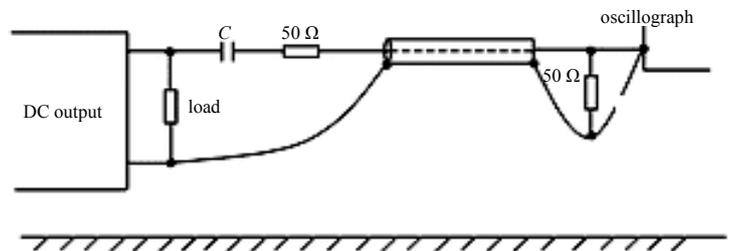


Fig.6 Coaxial-cable ripple measure  
图6同轴线纹波测量法

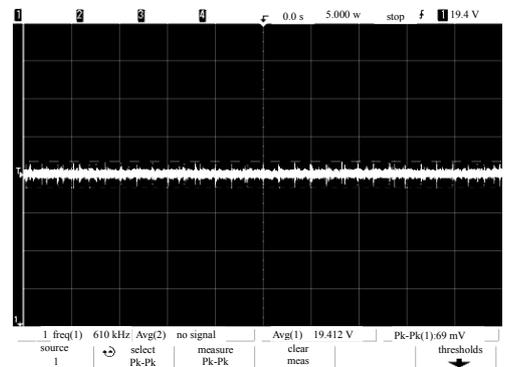


Fig.7 Actual ripple  
图7实测纹波

互感。综上所述,在PCB设计中,尽量加粗电源线和地线宽度,缩短长度;导线间的距离尽量大。布线尽量沿地线铺设。数字信号地和模拟信号地分开布线,在电源端一点连接;还应在地线和电源线之间安装高频特性好的去耦电容。

## 2.4 电箱设计

电子设备所产生的电磁干扰主要通过机箱的缝隙泄漏,必须对机箱电磁兼容设计给予充分重视。电性能良好的机箱可以通过反射和吸收方式降低电磁辐射能量,通常能将电磁干扰的强度衰减到原来的百分之一至百万分之一以上<sup>[8-9]</sup>。

本设计中,二次电源箱体及PCB板框均采用镁合金加工而成,PCB板首先安装到板框上,然后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2mm即可有效起到电磁屏蔽的作用。

屏蔽体的总体屏蔽效能由屏蔽体中最薄弱的环节决定,电控箱最薄弱的环节是各个面板之间的缝隙及面板与连接器的孔隙。

为了满足EMC设计要求,二次电源电箱各个侧板之间通过止口连接,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,保证接触紧密可靠;在连接器安装到面板时,之间放置铍铜片使连接器与面板紧密接触,以减少缝隙带来的电磁泄漏;板框和侧板之间靠导轨面接触,不可避免存在间隙,在其间也要放置铍铜片,以保证接触紧密可靠,提高电磁兼容能力。

## 3 结论

本文简要阐述了空间有效载荷二次电源系统的组成与原理,针对供电母线及电源内部线路干扰严重的现象,综合设计并优化了电源软启动电路、输入及输出滤波电路,完善了PCB设计与机箱电磁兼容设计,提高了电源的抗干扰水平。

通过对二次电源的输出电压线传导发射测试和机箱的辐射发射测试,发现其测量值均低于国军标中规定的极限值<sup>[10]</sup>;实测电源输入浪涌值与输出纹波均在设计允许范围之内。实验及工程应用表明,文中所提供的几种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现有至关重要的作用,上述方案可以单独使用,也可以根据不同情况组合使用,对于类似的设计提供了可供借鉴的范例。

### 参考文献:

- [1] 沈中,葛之江. 航天超光谱成像技术原理及发展现状[J]. 航天器工程, 2001,10(4):45-52.
- [2] 曲学基. 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] 马国伟. 高可靠性通信DC/DC电源模块的设计及生产[C]// 全国电源技术年会论文集. 扬州:[中国电源学会编辑委员会], 1997:186-193.
- [5] Mel Eide. Measurement and filtering of output noise of DC/DC converters[Z]. Interpoint databook of microelectronics, 1999.
- [6] 李杰,卞正才. 采用电磁带隙和磁性材料的PCB电源结构[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):21-22.
- [7] 李希茜. 开关电源的抗干扰设计[J]. 电源技术应用, 2002(6):31-33.
- [8] 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.
- [9] 范大祥,马双武. 电子设备的屏蔽设计[J]. 质量与可靠性, 2004(1):4-18.
- [10] 国防科学技术工业委员会. GJB151A-97军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 北京:科工委军标出版发行部, 1997.

### 作者简介:



王小朋(1978-),男,济南市人,硕士,助理研究员,主要从事空间载荷电源与控制系统方面的研究工作.email:sdwangxp@163.com.

于平(1963-),男,辽宁省大连市人,研究员,硕士生导师,主要从事空间光学遥感器嵌入式系统设计。

李东景(1981-),男,长春市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为空间遥感技术与辐射定标方面的研究工作。