

星载开关电源可靠性设计

The Reliability Design of On-satellite Switching Power Supply

俞绍安 中国航天科技集团上海空间电源研究所(上海 200233)

Yu Shaoan Shanghai Institute of Space Power-sources CASC (200233)

摘 要:本文从四个方面详细阐述了星载开关电源的可靠性设计,强调了可靠性设计的重要性。

叙 词:电路拓扑 电磁兼容 脉宽调制

Abstract: A reliability design of on-satellite switch power-sources is particularized from four aspects. So the importance of its reliability design is emphasized.

Keywords: circuit topology EMC PWM

[中图分类号] TM92 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2006)01-0051-03

1 引言

电子产品,特别是星载开关电源的设计是一个复杂的系统工程,不但要考虑电源本身的参数设计,还要考虑电气设计、电磁兼容设计、安全性设计、热设计等方面。因为任何方面,哪怕是极微小的疏忽,都有可能整个星载电源甚至整颗卫星的崩溃,所以星载电源产品可靠性设计至关重要。

2 开关电源电气可靠性设计

2.1 电路拓扑的选择

开关电源一般采用 Buck 型、Boost 型、Cuk 型、双管正激型、双管反激型、单端正激型、单端反激型、推挽型、半桥型、全桥型等十种拓扑。为避免开关管承受两倍直流输入电压并考虑到降额使用,一般采用双管正激型和半桥型电路。而推挽型和全桥型拓扑虽然也承受单倍直流输入电压,但可能出现单向偏磁饱和,使开关管损坏,故在高可靠性工程上一般选用双管正激型和半桥型电路拓扑。

2.2 控制方法的选择

电流型 PWM 控制较电压控制型有如下优点:自动对称校正、固有的电流限制、简单的回路补偿、纹波比电压控制型小得多和良好的并联工作能力。硬开关技术因开关损耗的限制,开关频率一般在 400kHz 以下;软开关技术利用谐振原理使开关器件在零电压开通或零电流关断,实现开关损耗为零,从而可使开关频率达到兆赫级水平。但是软开关技术主要应用于大功率电源,中小功率电源中仍以 PWM 技术为主。

2.3 元器件的选用

元器件直接决定了电源的可靠性,元器件的失效主要集中在以下四个方面。

1. 产品质量

质量问题造成的失效与工作应力无关。在卫星工程应用时选用定点生产厂家的成熟产品,不允许使用没有经过认证的产品。

2. 元器件可靠性

元器件可靠性问题即基本失效率的问题,这是一种随机性质的失效,与质量问题的区别是元器件的失效率取决于工作应

力水平。应先对元器件进行应力筛选试验,通过筛选可使元器件失效率降低1~2个数量级。当然,筛选试验代价(时间与费用)很大,但综合各方面因素还是合算的,研制周期也不会延长。电源设备主要元器件的筛选试验一般要求:

- 电阻在室温下按技术条件进行100%测试,剔除不合格品。
- 普通电容器在室温下按技术条件进行100%测试,剔除不合格品。

• 接插件按技术条件抽样检测各种参数。

• 半导体器件按以下程序进行筛选:

目检→初测→高温储存→高低温冲击→电功率老化
→高温测试→低温测试→常温测试

筛选结束后应计算剔除率 Q :

$$Q = (n/N) \times 100\%$$

式中, N 为受试样品总数; n 为被剔除的样品数。

如果 Q 超过标准规定的上限值,则本批元器件全部不准上机,并按有关规定处理。在符合标准规定时,可将筛选合格的元器件打漆点标注,然后入专用库房供装机使用。

3. 设计

(1) 元器件的选用

- 尽量选用硅半导体器件,少用或不用锗半导体器件。
- 多采用集成电路,减少分立器件的数目。
- 开关管选用 MOSFET 能简化驱动电路,减少损耗。
- 输出整流管尽量采用具有软恢复特性的二极管。
- 应选择金属封装、陶瓷封装、玻璃封装的器件。禁止选用塑料封装的器件。
- 集成电路必须是一类品或者是符合 MIL-M-38510、MIL-S-19500 标准 B-1 以上质量等级的军品。
- 设计时尽量少用继电器,确有必要时应选用接触良好的密封继电器。

• 原则上不选用电位器,必须保留的应进行固封处理。

• 吸收电容器与开关管和输出整流管的距离应当很近,因流过高频电流,故易升温,所以要求这些电容器具有高频低损耗和耐高温的特性。由于受空间粒子轰击时,电解质会分解,所以铝电解电容也不适用于航天电子设备的电源中。钽电解电容的温度和频率特性较好、耐高低温、储存时间长、性能稳定可靠,但钽电解电容较重、容积比低、不耐反压、高压(>125V)品种较少、价格昂贵。

(2) 降额设计

电子元器件的基本失效率取决于工作应力(包括电、温度、振动、冲击、频率、速度、碰撞等)。不同的元器件降额标准亦不同,实践表明,大部分电子元器件的基本失效率取决于电应力和温度,因而降额也主要是控制这两种应力。开关电源常用元器

件的降额系数如下:

- 电阻的功率降额系数在0.1~0.5之间。
- 二极管功率降额系数0.4以下,反向耐压的在0.5以下。
- 发光二极管电压降额系数在0.6以下,功率降额系数在0.6以下。
- 功率开关管电压降额系数在0.6以下,电流降额系数在0.5以下。
- 普通铝电解电容和无极性电容的电压降额系数在0.3~0.7之间。
- 钽电容的电压降额系数在0.3以下。
- 电感和变压器的电流降额系数在0.6以下。

4. 损耗

损耗引起的元器件失效取决于工作时间的长短,与工作应力无关。比如铝电解电容长期在高频下工作会使电解液逐渐损失,同时容量亦同步下降,当电解液损失40%时,容量下降20%。为防止发生故障,应在图纸上标明铝电解电容器更换的时间,到期强迫更换。

2.4 保护电路的设置

为使电源能在各种恶劣环境下可靠地工作,应设置多种保护电路,如防浪涌冲击、过压、欠压、过载、短路、过热等的保护电路。

3 电磁兼容性设计

开关电源因采用 PWM 技术,其脉冲波形呈矩形,上升沿与下降沿均包含大量的谐波成分,输出整流管的反向恢复也会产生电磁干扰(EMI),这是影响可靠性的不利因素,故电磁兼容性(EMC)成为系统的重要问题。产生电磁干扰有三个途径:干扰源、传输介质、接收单元。EMC 设计就是破坏这三个途径中的一个。

对于开关电源而言,主要是抑制干扰源,干扰源集中在开关电路与输出整流电路。采用的技术包括滤波技术、布局与布线技术、屏蔽技术、接地技术、密封技术等。EMI 按传播途径分为传导干扰和辐射干扰。传导噪声的频率范围很宽(10kHz~30MHz),解决办法之一是加装电源 EMI 滤波器、输出滤波器及吸收电路(参见图1)。电源 EMI 滤波器实际上是一种 LC 低通滤波器,它毫无衰减地把 50Hz 或 400Hz 交流电能传递给电子设备,却大大衰减传入的干扰信号,同时又能抑制设备本身产生的干扰信号,电源 EMI 滤波器最好安装在机壳电源线进口的插座附近。输出整流二极管的反向恢复也会引起电磁干扰,这种情况可以采用 RC 吸收电路来抑制电流的上升率(参见图1),通常 R 在 2~20Ω 之间, C 在 1000pF~10nF 之间, C 应选用高频瓷介电容。

良好的布局和布线技术也是控制噪声的一种重要手段。为减少噪声的发生和防止由噪声导致的误动作,应注意以下几点:

- 尽量缩小由高频脉冲电流所包围的面积。

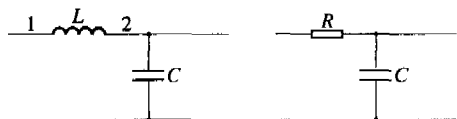


图1 EMI滤波和RC吸收电路

- 缓冲电路尽量贴近开关管和输出整流二极管。
- 脉冲电流流过的区域远离输入输出端子,使噪声源和出口分离。
- 控制电路和功率电路分开,采用单点接地方式,大面积接地容易引起天线效应,故不要采用大面积接地方式。
- 必要时可以将输出滤波电感安置在地回路上。
- 采用多只低ESR(等效串联电阻)的电容并联滤波。
- 采用铜箔进行低感低阻配线。
- 相邻印制线之间不应有过长的平行线,走线尽量避免平行,采用垂直交叉方式,线宽不要突变,也不要直角拐弯。禁止环形走线。
- 滤波器的输入和输出线必须分开。禁止将开关电源的输入线和输出线捆扎在一起。

对于辐射干扰,主要应用密封屏蔽技术。在结构上实行电磁封闭,要求外壳各部分之间具有良好的电磁接触,以保证电磁的连续性。目前卫星电源产品大都采用铝合金外壳,但铝合金导磁性能差,外壳需要镀一层镍或喷涂导电漆,内壁贴敷高导磁率的屏蔽材料。外壳永久连接处用导电胶粘牢或采用连续焊缝结构,需拆卸的可以用导电橡胶条压紧以保证电磁连续性。导电材料要求导电性能高、有弹性、具有最小的宽厚比。

4 安全性设计

就电源产品而言,必须进行安全性设计,对卫星电源尤其如此。电源产品安全性设计的内容主要是防止触电和烧伤。对于商用设备市场,具有代表性的安全标准有UL、CSA、VDE、CCC等,内容因用途而异,容许泄漏电流在0.5~5mA之间,我国军用标准GJB1412规定的泄漏电流小于5mA。电源设备对地泄漏电流的大小取决于EMI滤波器电容 C_Y 的容量。从EMI滤波器角度出发,电容 C_Y 的容量越大越好,但从安全性角度考虑,电容 C_Y 的容量越小越好,电容 C_Y 的容量根据安全标准来决定。若电容 C_Y 的安全性能欠佳,电网瞬态尖峰出现时可能被击穿,它的击穿虽然不危及人身安全,但会使滤波器丧失滤波功能。

为了防止误触电,插头座原则上产品端(非电源端)为针,电网端(电源端)为孔;电源设备之输入端为针,输出端为孔。

为了防止烧伤,对于可能与人体接触的暴露部件(散热器、机壳等),当环境温度为25℃时,其最高温度不应超过60℃,面板和手动调节部分的最高温度不超过50℃。

5 热设计

除了电应力之外,温度是影响设备可靠性最重要的因素。电源设备内部的温升将导致元器件的失效,当温度超过一定值时,失效率将呈指数规律增加,温度超过极限值时将导致元器件失效。国外统计资料表明,电子元器件温度每升高2℃,可靠性下降10%;温升50℃时的寿命只有温升25℃时的1/6。这就需要进行热设计,热设计的原则,一是减少发热量,即选用更优的控制方式和技术,如同步整流技术、移相控制技术等,另外就是选用低功耗的器件,减少发热器件的数目,加大加粗印制线的宽度,提高电源的效率。二是加强散热,即利用传导、对流、辐射原理将热量转移,包括采用散热器、风冷(自然对流和强迫风冷)、液冷(水、油)、热电致冷、热管等方法。

强迫风冷的散热量虽比自然冷却大10倍以上,但是由于风机产生了噪声和振动,故在一般情况下应尽量采用自然冷却,星载电源不采用风冷、液冷之类的冷却方式。在元器件布局时,应将发热器件安放在下风位置或在印制板的上部,散热器采用氧化发黑工艺处理,以提高辐射率,不允许用黑漆涂覆。散热器安装器件的平面要求光滑平整,一般在接触面涂上硅脂以提高导热率。变压器和电感线圈应选用较粗的导线来抑制温升。

6 结语

以上建议只适用于星载电源,对于商用和工业用产品可以在某些方面作出不同的选择。总之,电源设备可靠性的高低,不仅与电气设计,而且同元器件、结构、工艺、装配、加工质量等方面有关。可靠性是以设计为基础的,在实际工程应用上,还应通过各种试验取得反馈数据来完善设计,进一步提高电源的可靠性。

参考文献

- [1] 叶慧贞,杨兴洲. 新颖开关稳压电源. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [2] 刘胜利. 现代高频开关电源实用技术. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [3] 陆廷孝,郑鹏洲. 可靠性设计与分析. 北京:国防工业出版社, 1996.
- [4] 可靠性模型的建立和可靠性分析. 内部刊物.
- [5] 可靠性数据工作手册. 内部刊物.

作者简介

俞绍安,工学硕士,工程师,主要从事卫星电源系统研究。

收稿日期:2005-08-25

定稿日期:2005-12-22