

摘要：对影响军用 PWM 型开关稳压电源可靠性的因素作出较为详细的分析比较，并从工程实际出发提出一些提高开关电源可靠性的建议。

关键词：开关电源 可靠性

## 1 引言

电子产品，特别是军用稳压电源的设计是一个系统工程，不但要考虑电源本身参数设计，还要考虑电气设计、电磁兼容设计、热设计、安全性设计、三防设计等方面。因为任何方面哪怕是最微小的疏忽，都可能导致整个电源的崩溃，所以我们应充分认识到电源产品可靠性设计的重要性。

## 2 开关电源电气可靠性设计

### 2.1 供电方式的选择

集中式供电系统各输出之间的偏差以及由于传输距离的不同而造成的压差降低了供电质量，而且应用单台电源供电，当电源发生故障时可能导致系统瘫痪。分布式供电系统因供电单元靠近负载，改善了动态响应特性，供电质量好，传输损耗小，效率高，节约能源，可靠性高，容易组成  $N+1$  冗余供电系统，扩展功率也相对比较容易。所以采用分布式供电系统可以满足高可靠性设备的要求。

### 2.2 电路拓扑的选择

开关电源一般采用单端正激式、单端反激式、双管正激式、双单端正激式、双正激式、推挽式、半桥、全桥等八种拓扑。单端正激式、单端反激式、双单端正激式、推挽式的开关管的承压在两倍输入电压以上，如果按 60% 降额使用，则使开关管不易选型。在推挽和全桥拓扑中可能出现单向偏磁饱和，使开关管损坏，而半桥电路因为具有自动抗不平衡能力，所以就不会出现这个问题。双管正激式和半桥电路开关管的承压仅为电源的最大输入电压，即使按 60% 降额使用，选用开关管也比较容易。在高可靠性工程上一般选用这两类电路拓扑。

### 2.3 控制策略的选择

在中小功率的电源中，电流型 PWM 控制是大量采用的方法，它较电压控制型有如下优点：逐周期电流限制，比电压型控制更快，不会因过流而使开关管损坏，大大减小过载与短路的保护；优良的电网电压调整率；迅捷的瞬态响应；环路稳定，易补偿；纹波比电压控制型小得多。生产实践表明电流控制型的 50W 开关电源的输出纹波在 25mV 左右，远优于电压控制型。

硬开关技术因开关损耗的限制，开关频率一般在 350kHz 以下，软开关技术是应用谐振原理，使开关器件在零电压或零电流状态下通断，实现开关损耗为零，从而可将开关频率提高到兆赫级水平，这种应用软开关技术的变换器综合了 PWM 变换器和谐振变换器两者的优点，接近理想的特性，如低开关损耗、恒频控制、合适的储能元件尺寸、较宽的控制范围及负载范围，但是此项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。

### 2.4 元器件的选用

因为元器件直接决定了电源的可靠性，所以元器件的选用非常重要。元器件的失效主要集中在以下四个方面：

#### (1) 制造质量问题

质量问题造成的失效与工作应力无关。质量不合格的可以通过严格的检验加以剔除，在工程应用时应选

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) 元器件可靠性问题

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。在一定的应力水平下，元器件的失效率会大大下降。为剔除不符合使用要求的元器件，包括电参数不合格、密封性能不合格、外观不合格、稳定性差、早期失效等，应进行筛选试验，这是一种非破坏性试验。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，但综合维修、后勤保障、整架联试等还是合算的，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→高温贮存→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——受试样品总数；

n——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，则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) 设计问题

首先是恰当地选用合适的元器件：

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。

在潮湿和盐雾环境下，铝电解电容会发生外壳腐蚀、容量漂移、漏电流增大等情况，所以在舰船和潮湿环境，最好不要用铝电解电容。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、高压品种(>125V)较少、价格昂贵。

关于降额设计：

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)。除个别

低应力失效的元器件外，其它均表现为工作应力越高，失效率越高的特性。为了使元器件的失效率降低，所以在电路设计时要进行降额设计。降额程度，除可靠性外还需考虑体积、重量、成本等因素。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，以下为开关电源常用元器件的降额系数：

电阻的功率降额系数在 0.1~0.5 之间。

二极管的功率降额系数在 0.4 以下，反向耐压在 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) 损耗问题

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。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%；电解液损失 0% 时，容量下降 40%，此时电容器芯子已基本干涸，不能再予使用。为防止发生故障，一般情况下应在图纸上标明铝电解电容器更换的时间，到期强迫更换。

### 2.5 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、过热等保护电路。

### 3 电磁兼容性(EMC)设计

开关电源因采用脉冲宽度调制(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，另外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，因而使电磁兼容性成为系统的重要问题。

产生电磁干扰有三个必要条件：干扰源、传输介质、敏感接收单元，EMC 设计就是破坏这三个条件中的一个。

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，从 10kHz~30MHz，我们虽然知道产生干扰的原因，但从效率上来讲，通过控制脉冲波形的上升与下降时间来解决未必是一个好办法，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 2。电源 EMI 滤波器实际上是一种低通滤波器，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，防止它窜入电网，危害公网其它设备。选择 EMI 滤波器是根据插入损耗的大小来选择滤波器网络结构和元器件参数，根据实际要求选择额定电压、额定电流、漏电流、绝缘电阻、温度条件等参数。电源 EMI 滤波器最好安装在机壳电源线进口的插座附近。抑制输出噪声的对策基本上按 10kHz~150kHz、150kHz~10MHz、10MHz 以上三个频段来解决。10kHz~150kHz 范围内主要是常态噪声，一般采用通用 LC 滤波器来解决。150kHz~10MHz 范围内主要是共模成分的噪声，通常采用共模抑制滤波器来解决。共模扼流圈要采用导磁率高、频率特性较佳的铁氧体磁性材料，电感量在 (1~2) mH、电容量在 3300pF~4700pF 之间，如果控制低频

段的噪声，可以适当加大 LC 的取值。在 10MHz 以上频率段的对策是改进滤波器的外形。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，通常 R 在 $(2\sim 20)\Omega$  之间，C 在 1000pF $\sim$ 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个重要手段。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。

- 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作用，所以建议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，也不要突然拐角。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。目前为减少重量大都采用铝合金外壳，但铝合金导磁性能差，因而外壳需要镀一层镍或喷涂导电漆，内壁贴覆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来保证电磁连续性。导电材料要求导电性能高、有弹性、具有最小的宽厚比。

#### 4 电源设备可靠性热设计

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 $^{\circ}\text{C}$ ，可靠性下降 10%；温升 50 $^{\circ}\text{C}$  时的寿命只有温升 25 $^{\circ}\text{C}$  时的 1/6。需要在技术上采取措施限制机箱及元器件的温升，这就是热设计。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，如移相控制技术、同步整流技术等，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、辐射、对流技术将热量转移，这包括采用散热器、风冷（自然对流和强迫风冷）、液冷（水、油）、热电致冷、热管等方法。

强迫风冷的散热量比自然冷却大十倍以上，但是要增加风机、风机电源、联锁装置等，这不仅使设备的成本和复杂性增加，而且使系统的可靠性下降，另外还增加了噪声和振动，因而在一般情况下应尽量采用自然冷却，而不采用风冷、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。喷涂三防漆后会影响散热效果，需要适当加大裕量。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。

#### 5 安全性设计

对于电源而言，安全性历来被确定为最重要的性能之一，不安全的产品不但不能完成规定的功能，而且还有可能发生严重事故，造成机毁人亡的巨大损失。为保证产品具有相当高的安全性，必须进行安全性设

计。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 等，内容因用途而异，容许泄漏电流在  $0.5\text{mA} \sim 5\text{mA}$  之间，我国军用标准 GJB1412 规定的泄漏电流小于  $5\text{mA}$ 。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，如图 2 所示。从 EMI 滤波器角度出发电容  $C_y$  的容量越大越好，但从安全性角度出发电容  $C_y$  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  $C_x$  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  $25^\circ\text{C}$  时，其最高温度不应超过  $60^\circ\text{C}$ ，面板和手动调节部分的最高温度不超过  $50^\circ\text{C}$ 。

## 6 三防设计

三防设计是指防潮设计、防盐雾设计和防霉菌设计。

在设计时，对于密封有要求的元器件应采取密封措施；对于不可修复的组合装置可采用环氧树脂灌封；所用元器件、原材料的吸湿度应较小，不得使用含有棉、麻、丝等易霉制品；对密封机箱、机柜应设置防护网，以防昆虫和啮齿动物进入；直接暴露在大气中装置的外顶部不应采用凹陷结构，避免积水导致腐蚀；可以选用耐蚀材料，再通过镀、涂或化学处理使电子设备及其零部件的表面覆盖一层金属或非金属保护膜，隔离周围介质；在结构上采用密封或半密封形式来隔绝外部不利环境；对印制板及组件表面涂覆专用的三防清漆可以有效地避免导线之间的电晕、击穿，提高电源的可靠性；电感、变压器应进行浸漆、端封，以防潮气进入引发短路事故。

## 7 结语

以上建议只适用于军用电源，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、装配、工艺、加工质量等方面有关。可靠性是以设计为基础，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。