

大功率 BUCK DC-DC 系统可靠性研究

序言

随着电子产品轻、薄、小的发展趋势，要求电子元件体积更小，耗能更低。开关电源作为电子设备中不可或缺的组成部分也在不断的改进。高效率、高可靠、低耗、低噪声、抗干扰和模块化，成了开关电源的发展方向。

BUCK DC-DC 作为开关电源中的一个分支，也在不断进步，优化。下面通过对 DC-DC 系统的可靠性设计，能够减少 DC-DC 系统发生故障的概率，提高电子设备的稳定性和可靠性。

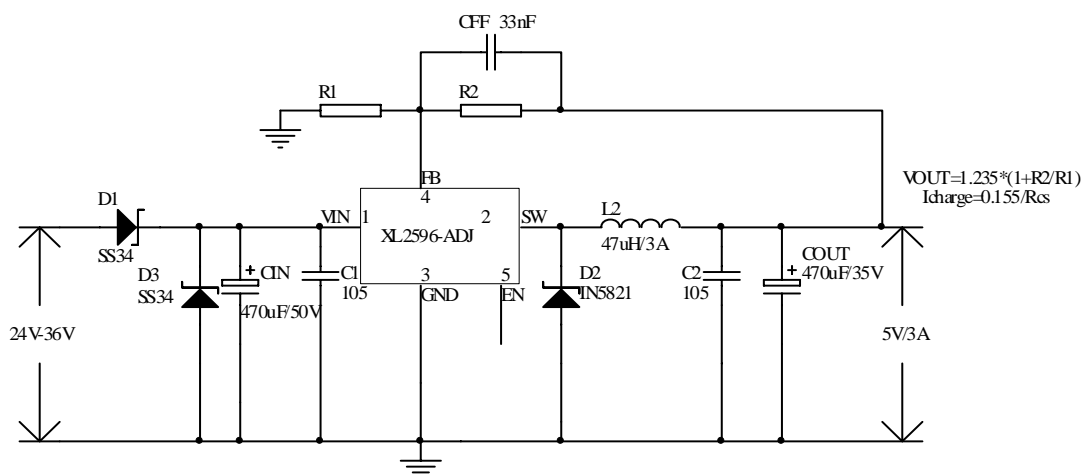
常用可靠性设计方法

常用可靠性设计方法有以下几种：采用优选电路和优化设计，降额设计，热设计，电磁兼容设计。

采用优选电路和优化设计

优选电路是通过定量和定性的测定，分析来对系统电路结构选取一种方法。根据系统需要实现的具体要求，采用合适的电路拓扑和电子元器件。

电路的优化设计是指在电路设计已基本满足功能和特性指标的基础上，根据要求的电路特性（Constraints）（例如要求电路的延时时间不能大于某一值），调整电路中的元器件参数（例如调整偏置电阻），是电路指标要求（Performance Goal，又称为目标参数）（例如电路的功耗）为某一数值。



以 XL2596 外围参数选型为例。输入电压 24V，输出电压 5V，输出电流 3A，芯片开关频率 $F=150\text{KHz}$ 。

1、输出电感选择

$dIL = (V_{in} - V_{out}) * T_{on} / L$ $T_{on} = T * (V_{out} / V_{in})$ $T = 1/f$ ，L 电感量的选取原则使电感纹波电流为电感电流的 20%（可根据应用改变） $dIL = 0.2IL = 0.2I_{out}$
 $L = 5(V_{in} - V_{out})V_{out} * T / (V_{in} * I_{out}) = 43.98 \mu\text{H}$ ，可选用 $47 \mu\text{H}/3\text{A}$ 电感。

如果电感减小，较小的电感将要求较高开关电流，系统工作在不连续模式，较大的电感会带来高成本，开关系统也会变成连续模式。

2、续流二极管选择

续流二极管的最大承受电流能力至少要为最大负载电流的 1.3 倍；续流二极管的反向耐压至少要为最大输入电压的 1.25 倍；续流二极管必须是快恢复的且必须靠近芯片，建议选择肖特基二极管，超快恢复和高效整流二极管，如肖特基二极管 1N5821 等。

续流二极管一定要使用肖特基二极管或者超快恢复二极管，因为芯片开关频率高，瞬态响应速度要快。反向耐压要大于输入电压。

3、输出电容选择

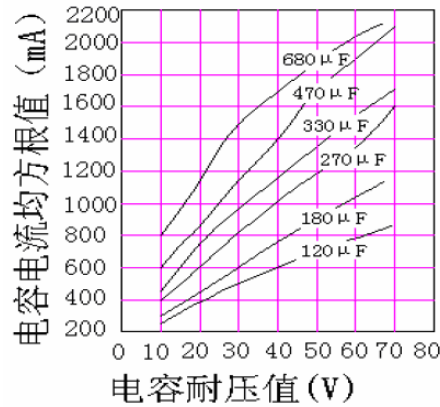
电容量的计算： $Q = I * t = C * \Delta V$ $t = C * \Delta V / I$ ，其中 I 为动态负载（电流）最大变化
 $\Delta V = 100\text{mV}$ ， $V_{ripple} = 50\text{mV}$ ，由 $(V_{out}/V_{in} = D)$ 知 $T_{off}(\text{max}) \sim 1.389 \mu\text{s}$ 。

以一般规范 动态变化测试： $0.25 * I_{max}$ $0.75 * I_{max}$ 即 $I_{out}(\text{max}) * 50\%$ （PC power 规范） $I_{out}(\text{max}) * 50\% = 1.5\text{A}$ ---- $I(\text{max})$ $t = T_{off} + (2 * T)$ 代入上式得 $1.5A * [T_{off} + (2 * T)] = C * \Delta V$ ，由上式得出 $C_{min} = 220.8 \mu\text{F}$ ，可选择 $470 \mu\text{F}/35\text{V}$ 的电容。

如果输出电容容量选择太小，会导致系统输出纹波大。选择输出电容容量太大，体积和成本上有压力，但是大容量电容的 ESR 相对与同样小容量电容 ESR 小一些，可以减小系统纹波。

4、输入电容选择

输入耐压和电流均方根是输入电容的重要参数。如果输入电压是 28V，那么，铝电解电容的耐压要大于 $42\text{V} (1.5 * V_{in})$ ，可选用 50V 耐压的电容。使用电容耐压值是一种保守的方法，必要时可以对它加以修正。XL2596 的输入电容的电流均方根大约是直流负载电流的一半，在本例中，负载电流为 3A，那么，输入电容的电流均方根至少为 1.5A，利用下图所示的曲线图可以选择合适的电容。在曲线图中，注意 50V 的电压线所对应的电流均方根值大于 1.50A 的电容，于是，我们就可以选出一个 $680 \mu\text{F}/50\text{V}$ 或者 $470 \mu\text{F}/50\text{V}$ 的电容。对于选择直插元件的设计， $680 \mu\text{F}/50\text{V}$ 的电解电容就足够了，其他种类或其他厂家的电容可以用来提供足够的均方根纹波电流。对于选择表贴元件的设计，可以选用固态钽电容，但是，要注意的是，必须测试电容的浪涌电流值。



电解电容耐压值、电容值和均方根电流之间的关系

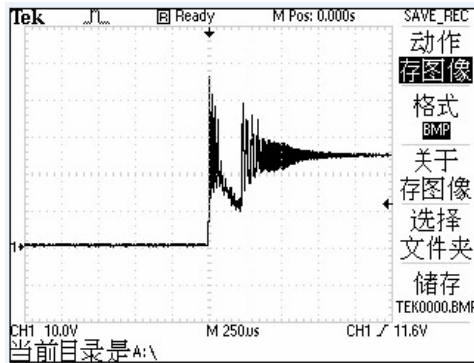
5、输入防反接保护

输入的正负极接反，芯片内部 PN 结正向偏置，二极管 $V_f=0.7V$ ，输入电压 24V-36V，导致芯片失效。解决方法是在输入端接一个肖特基二极管，如 D1，反向耐压要超过输入电压。

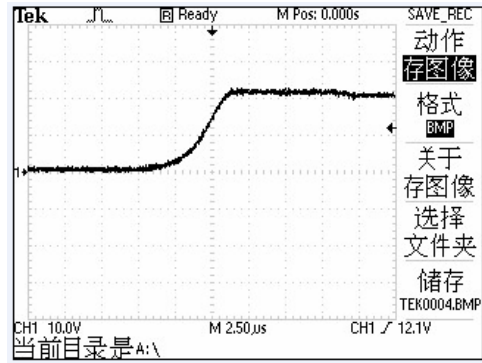
6、输入电压瞬态保护

开关输入端，如果输入电源不稳定，瞬态高压或者电路板寄生参数较大，XL2596 芯片输入端瞬态高压大电流，会导致芯片失效。解决方法是在输入端与 GND 之间接一个肖特基二极管或者 TVS 二极管 (D2)，反向耐压要大于输入电压，而小于芯片最高输入电压；PCB 布局走线方面，输入端和 GND 要粗，直，短，少拐弯，尽量减小寄生电感和寄生电阻。

下图为输入端上电波形。



未接 D1 上电波形



接上 D1 上电波形

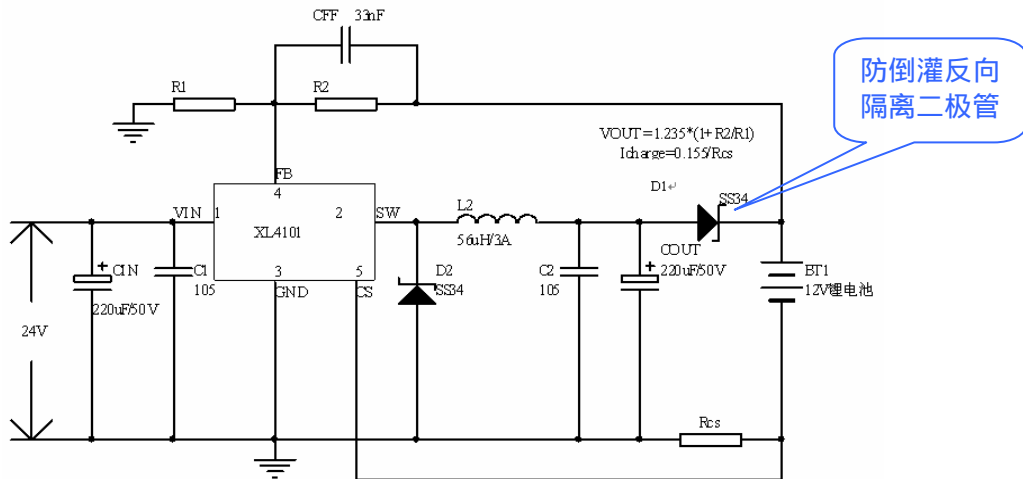
7、电池输出时，防倒灌保护

做电池负载充电应用，如果输出电压比较大(>12V)，如图一方是连接的话，芯片会有失效的可能。失效有两种模式：

如果输出电池包连接上，但是芯片的输入电源没有接时，内部的功率晶体管的基极相当于悬空状态，这样一来 SW 点对 VIN 和 GND 的反向耐压大大降低，如果输出电池包的电压比较高的话，可能导致输出电池通过电感反向漏电而烧毁功率管；

如果电池包连接上，芯片反复上电，当输出电源从接上到关断的瞬间，输出电池电压+电感电压(由于电感中有储能)反向倒灌到 SW 点烧毁内部功率管。

通常用做电池负载充电应用时，如果输出电压比较大(>12V)，都必须增加防倒灌反向隔离二极管 D1；如果输出电压比较低，则不需要，因为芯片 SW 点的反向耐压足够。解决方法是在输出电感的前面或者后面串联一个正向的肖特基二极管，来防止输出电池组的电压反向倒灌进入芯片内。



降额设计

降额设计：为了提升电子设备的可靠性而常用，主要是指构成电子设备的元器件使用中所承受的应力（电应力和温度应力）低于元器件本身的额定值，以达到延缓其参数退化，增加工作寿命，提高使用可靠性的目的。

降额设计的主要因素及关键，降额主要因素：电应力和温度；降额设计的关键：降额的程度与效果；施加在电子元器件上的电应力、热应力大小直接影响电子元器件的失效率高。如锗 NPN 晶体管基本失效率与电应力及热应力关系，如果温度不变（0℃），而从满负荷使用降至额定负荷的 0.1 使用，则基本失效率降低了 6 倍；如果电应力不变（额定负荷的 0.1）而温度从 90℃ 降至 0℃，则基本失效率降低了 16 倍；如果负荷及温度都降低，电应力从额定值 0.6 降至 0.1，而温度从 55℃ 降至 0℃，则基本失效率降低到原来的 1/20。

降额系数(S) 降额系数 $S = \text{工作应力} / \text{额定应力}$

应力泛指：电应力(电压、电流和功率)和热应力不同的电子器件在不同的环境有不同的应力表现。

电应力降额容易，对温度降额，主要依靠热设计。

热设计

热失效是最常见的一种失效模式，电流过载，局部空间内短时间内通过较大的电流，会

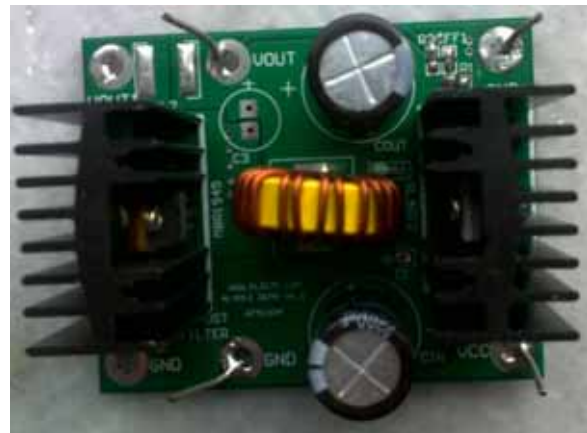
转化成热，热聚集不易散掉，导致局部温度快速升高，过高的温度会烧毁导电铜皮、导线和器件本身。所以电失效的很大一部分是热失效。

产品的热设计是一个系统性的工程，它指导并贯穿整个产品的设计工作，因此需要热设计工程师既要有深厚的理论知识，如传热学、流体力学、机械设计等，还要拥有丰富的工程经验，只有这样才能在新产品的设计中既提高产品的竞争力又缩短研发周期。

对于热设计工程师来说，当我们拿到一个项目的时候，首先应该了解该产品的使用环境、使用要求、基本结构及总功耗等，然后根据这些信息，确定该产品采用自然散热还是风冷。对于自然散热的设备而言，我们主要关注的就是如何让内部的热量尽量通过传导，导出产品外部，然后通过空气的自然流动将热量带走。芯龙公司测试板 PCB 设计如下图：



XL4003 测试板



XL4012 测试板

一般的热设计思路有三个措施：降耗、导热、布局。如何减小功耗的产生，大功耗器件和外界之间的热阻，让热量快速传到外部。

热设计的常规方法如下几点：

1、降耗是最原始最根本的解决方式。

选择系统效率高，发热低的元器件。例如 12V-5V/2A，由于 XL4003 比 XL2596 效率高，系统发热低，建议使用 XL4003。其他续流二极管选择 V_f 较小的二极管，电感选择低阻高频电感，电容选择高速低阻电容；芯片的选择方面在合适的空间范围内，选择效率高，散热好的芯片。同样输出功率，散热效果由高到低排列为 TO220>TO263>TO252>SOP8-EP>SOP8。

2、其次是导热。

导热最主要的是减小与外界之间热阻。(1) 对靠近热源的热敏元件，采用物理隔离法或绝热法进行热屏蔽；(2) PCB 用多层板结构；(3) 散热装置(热槽、散热片、风扇)用措施减少热阻；(4) 被散热器件与散热器之间充填导热膏(脂)，以减小接触热阻；(5) 被散热器件与散热器之间要有良好的接触。

3、再者是布局。

合理的布局也是减小与外界之间热阻的重要方法。

(1) 元器件布局减小热阻的措施：元器件安装在最佳自然散热的位置上；元器件热流通道要短、横截面要大和通道中无绝热或隔热物；发热元件分散安装；元器件在印制板上竖立排放；

(2) 元器件排放减少热影响：有通风口的机箱内部，电路安装应服从空气流动方向：进风口 放大电路 逻辑电路 敏感电路 集成电路 小功率电阻电路 有发热元件电路 出风口，构成良好散热通道；发热元器件要在机箱上方，热敏感元器件在机箱下方，利用机箱金属壳体作散热装置；

(3) 合理布局准则：将发热量大的元件安装在条件好的地方，如靠近通风孔；将热敏元件安装在热源下面。零件安装方向横向面与风向平行，利于热对流。在自然对流中，热流通道尽可能短，横截面积应尽量大；冷却气流流速不大时，元件按叉排方式排列，提高气流紊流程度、增加散热效果；发热元件不安装在机壳上时，与机壳之间的距离应 $>35\sim 40\text{cm}$ 。

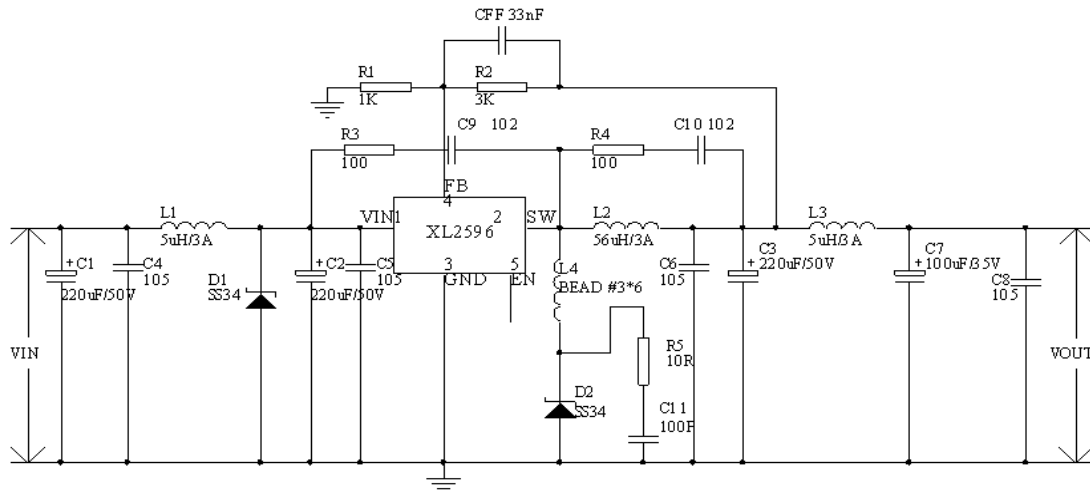
电磁兼容设计

电磁兼容性 (EMC) 是指设备或系统在其电磁环境中符合要求运行并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力。因此，EMC 包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值；另一方面是指器具对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰度，即电磁敏感性。

EMC 包括 EMI(电磁干扰)及 EMS(电磁耐受性)两部份，所谓 EMI 电磁干扰，乃为机器本身在执行应有功能的过程中所产生不利于其它系统的电磁噪声；而 EMS 乃指机器在执行应有功能的过程中不受周围电磁环境影响的能力。

1、EMI 产生原因及抑制方法

EMI 产生的原因：由于 PWM(脉宽调制)型开关电源 IC 是以垂直斩波方式工作的，其电压或电流波形为矩形波。从傅里叶级数理论分析，其谐波频带相当宽，可达数 GHz，各谐波分量幅度较大。特别是在主开关管开通和关断时间极短的情况下，它对周围电子设备运行干扰很大，严重时会造成周围设备工作不正常。



图二

电磁干扰 (Electromagnetic Interference), 简称 EMI, 有传导干扰和辐射干扰两种。

对传导干扰的抑制

(1) 对功率开关晶体管的开关电压波形进行“整形”, 如图二中的 R3 和 C9;

(2) 在输入端加接电源滤波器。加接电源滤波器是抑制电源线传导性干扰最主要而有效的方法, 如上图的 C1, C4, C2, C5 和 L1 组成的电源滤波器;

(3) 在输出端加接二级滤波。加接二级滤波是抑制电源输出线传导性干扰如上图的 C7 和 L3 组成的二级滤波;

(4) 输出滤波电感和电容的选择, 抑制电感瞬间峰值电流可以加大电感量或者并联一个 RC 缓冲电路, 如 L2 和 R4, C10; 输出电容高频特性要好, 避免在频率比较高的情况下, 电容呈感性, 可以采用多只高频较大容量的电解电容器或者钽电容器并联方法。高频电解电容器的谐振频率可达数十千赫兹至一百千赫兹左右, 能够滤除开关电源输出的低频谐波分量。对于一百千赫兹至一兆赫兹之间的谐波分量, 可以使用容量较大、高频特性较好的无极性电容器来滤除;

(5) 电路印制板布局和布线技术, 要使元器件之间的布线尽量短, 以减小布线长度, 由于导体电感、交流阻抗对电路特性的影响, 还可以减小导体电磁波的辐射; 注意元器件之间的电磁耦合, 强电场源(如高压电容和 du/dt 大的开关管等)应与对电场敏感的器件(如 VMOS 管、高灵敏度放大器等)分开, 必要时可加电场或磁场屏蔽; 强弱信号要严格分开, 避免强信号干扰弱信号回路, 影响电路的稳定性; 尽量减小高频电流与路径环面积, 以减小高频电磁场的辐射。

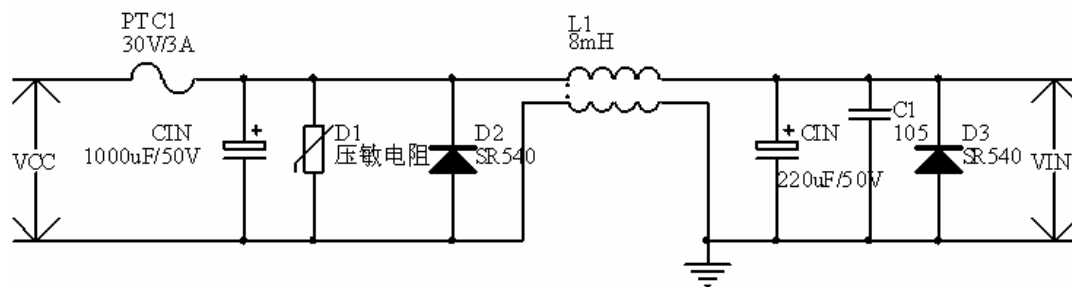
对辐射干扰的抑制

辐射干扰抑制有三个方面的, 电路设计上减小系统的辐射; 阻隔传播途径; 提高受干扰源的抗干扰能力。

- (1) 尽量缩短电路引线的长度和减小电流回路的面积，是减小电磁辐射的有效方法；
- (2) 正确使用储能滤波电容，把储能滤波电容尽量近地安装在有源器件电源引线的两端，每个有源器件独立供电，或单独用一个储能滤波电容供电(充满电的电容可以看成是一个独立电源)，防止各电路中的有源器件(放大器)通过电源线和地线产生串扰；
- (3) 把电源引线的地和信号源的地严格分开，或对信号引线采取双线并行对中交叉的方法，让干扰信号互相抵消，也是一种减小电磁辐射的有效方法；利用散热片也可以对电磁干扰进行局部屏蔽，对信号引线还可以采取双地线并行屏蔽的方法，让信号线夹在两条平行地线的中间，这相当于双回路，干扰信号也会互相抵消，屏蔽效果非常显著；
- (4) 可以阻隔传播途径，机器或敏感器件采用金属外壳是最好的屏蔽电磁干扰方法，但非金属外壳也可以喷涂导电材料(如石墨)进行电磁干扰屏蔽。

2、提高 EMS 能力的方法

EMS(Electro Magnetic Susceptibility, 电磁抗扰度), 处在一定环境中的设备或系统, 在正常工作时, 设备或系统能承受相应标准规定范围内的电磁能量干扰。



提高系统抗干扰能力有以下几种方法：

- (1) 在电源的输入端加入输入电源滤波器，该滤波网络由共模滤波器和 型差模滤波组成。如 L1, CIN, C1；
- (2) 合理的使用气体放电管，压敏电阻，电压钳位型瞬态抑制二极管（TVS）或者肖特基二极管，热敏电阻（PTC），保险管，熔断器，空气开关等元器件来实现。