

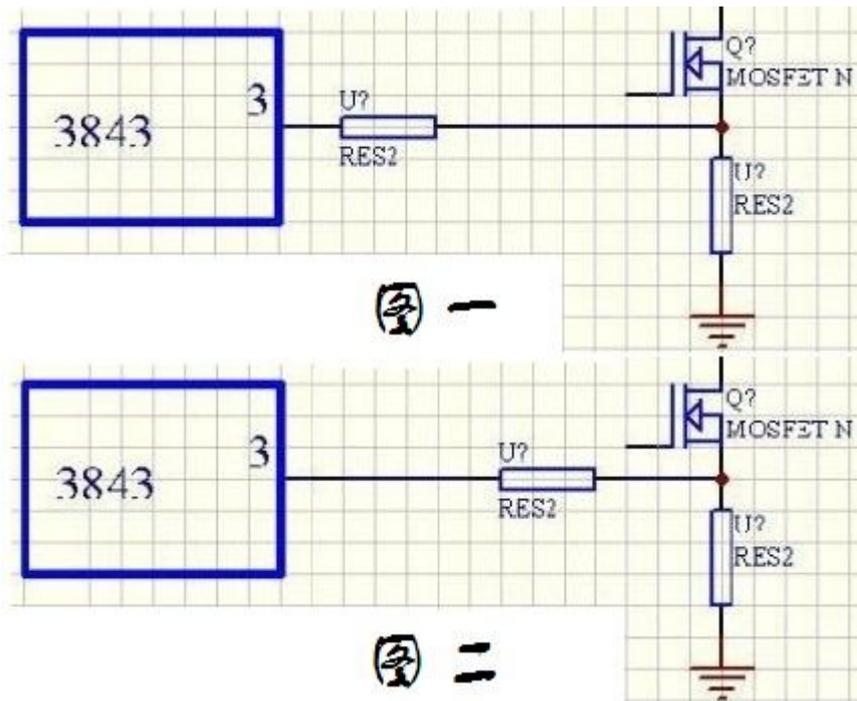
开关电源的系统设计详解

首先从开关电源的设计及生产工艺开始描述吧，先说说印制板的设计。开关电源工作在高频率，高脉冲状态，属于模拟电路中的一个比较特殊种类。布线时须遵循高频电路布线原则。

1、布局：脉冲电压连线尽可能短，其中输入开关管到变压器连线，输出变压器到整流管连接线。脉冲电流环路尽可能小如输入滤波电容正到变压器到开关管返回电容负。输出部分变压器出端到整流管到输出电感到输出电容返回变压器电路中 X 电容要尽量接近开关电源输入端，输入线应避免与其他电路平行，应避免。Y 电容应放置在机壳接地端子或 FG 连接端。共模电感应与变压器保持一定距离，以避免磁耦合。如不好处理可在共模电感与变压器间加一屏蔽，以上几项对开关电源的 EMC 性能影响较大。

输出电容一般可采用两只一只靠近整流管另一只应靠近输出端子，可影响电源输出纹波指标，两只小容量电容并联效果应优于用一只大容量电容。发热器件要和电解电容保持一定距离，以延长整机寿命，电解电容是开关电源寿命的瓶颈，如变压器、功率管、大功率电阻要和电解保持距离，电解之间也须留出散热空间，条件允许可将其放置在进风口。

控制部分要注意：高阻抗弱信号电路连线要尽量短如取样反馈环路，在处理时要尽量避免其受干扰、电流取样信号电路，特别是电流控制型电路，处理不好易出现一些想不到的意外，其中有一些技巧，现以 3843 电路举例见图（1）图一效果要好于图二，图二在满载时用示波器观测电流波形上明显叠加尖刺，由于干扰限流点比设计值偏低，图一则没有这种现象、还有开关管驱动信号电路，开关管驱动电阻要靠近开关管，可提高开关管工作可靠性，这和功率 MOSFET 高直流阻抗电压驱动特性有关。



下面谈一谈印制板布线的一些原则。

线间距：随着印制线路板制造工艺的不断完善和提高，一般加工厂制造出线间距等于甚至小于 0.1mm 已经不存在什么问题，完全能够满足大多数应用场合。考虑到开关电源所采用的元器件及生产工艺，一般双面板最小线间距设为 0.3mm，单面板最小线间距设为 0.5mm，焊盘与焊盘、焊盘与过孔或过孔与过孔，最小间距设为 0.5mm，可避免在焊接操作过程中出现“桥接”现象。这样大多数制板厂都能够很轻松满足生产要求，并可以把成品率控制得非常高，亦可实现合理的布线密度及有一个较经济的成本。

最小线间距只适合信号控制电路和电压低于 63V 的低压电路，当线间电压大于该值时一般可按照 500V/1mm 经验值取线间距。

鉴于有一些相关标准对线间距有较明确的规定，则要严格按照标准执行，如交流入口端至熔断器端连线。某些电源对体积要求很高，如模块电源。一般变压器输入侧线间距为 1mm 实践证明是可行的。对交流输入，（隔离）直流输出的电源产品，比较严格的规定为安全间距要大于等于 6mm，当然这由相关的标准及执行方法确定。一般安全间距可由反馈光耦两侧距离作为参考，原则大于等于这个距离。也可在光耦下面印制板上开槽，使爬电距离加大以满足绝缘要求。一般开关电源交流输入侧走线或板上元件距非绝缘的外壳、散热器间距要大于 5mm，输出侧走线或器件距外壳或散热器间距要大于 2mm，或严格按照安全规范执行。

常用方法：上文提到的线路板开槽的方法适用于一些间距不够的场合，顺便提一下，该法也常用来作为保护放电间隙，常见于电视机显象管尾板和电源交流输入处。该法在模块电源中得到了广泛的应用，在灌封的条件下可获得很好的效果。

方法二：垫绝缘纸，可采用青壳纸、聚脂膜、聚四氟乙烯定向膜等绝缘材料。一般通用电源用青壳纸或聚脂膜垫在线路板上金属机壳间，这种材料有机械强度高，有有一定抗潮湿的能力。聚四氟乙烯定向膜由于具有耐高温的特性在模块电源中得到广泛的应用。在元件和周围导体间也可垫绝缘薄膜来提高绝缘抗电性能。

注意：某些器件绝缘被覆套不能用来作为绝缘介质而减小安全间距，如电解电容的外皮，在高温条件下，该外皮有可能受热收缩。大电解防爆槽前端要留出空间，以确保电解电容在非常情况时能无阻碍地泻压。

下面谈一谈印制板铜皮走线的一些事项：

走线电流密度：现在多数电子线路采用绝缘板缚铜构成。常用线路板铜皮厚度为 $35\mu\text{m}$ ，走线可按照 $1\text{A}/\text{mm}$ 经验值取电流密度值，具体计算可参见教科书。为保证走线机械强度原则线宽应大于或等于 0.3mm （其他非电源线路板可能最小线宽会小一些）。铜皮厚度为 $70\mu\text{m}$ 线路板也常见于开关电源，那么电流密度可更高些。

补充一点，现常用线路板设计工具软件一般都有设计规范项，如线宽、线间距，早盘过孔尺寸等参数都可以进行设定。在设计线路板时，设计软件可自动按照规范执行，可节省许多时间，减少部分工作量，降低出错率。

一般对可靠性要求比较高的线路或布线线密度大可采用双面板。其特点是成本适中，可靠性高，能满足大多数应用场合。

模块电源行列也有部分产品采用多层板，主要便于集成变压器电感等功率器件，优化接线、功率管散热等。具有工艺美观一致性好，变压器散热好的优点，但其缺点是成本较高，灵活性较差，仅适合于工业化大规模生产。

单面板，市场流通常用开关电源几乎都采用了单面线路板，其具有低成本的优势，在设计，及生产工艺上采取一些措施亦可确保其性能。

今天谈谈单面印制板设计的一些体会，由于单面板具有成本低廉，易于制造的特点，在开关电源线路中得到广泛应用，由于其只有一面缚铜，器件的电器连接，机械固定都要依靠那层铜皮，在处理时必须小心。

为保证良好的焊接机械结构性能，单面板焊盘应稍微大一些，以确保铜皮和基板的良好缚着力，而不至于受到震动时铜皮剥离、断脱。一般焊环宽度应大于 0.3mm 。焊盘孔直径应略大于器件引脚直径，但不宜过大，保证管脚与焊盘间由焊锡连接距离最短，盘孔大小以不妨碍正常查件为度，焊盘孔直径一般大于管脚直径 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$ 。多引脚器件为保证顺利查件，也可更大一些。

电气连线应尽量宽，原则宽度应大于焊盘直径，特殊情况应在连线于与焊盘交汇必须将线加宽（俗称生成泪滴），避免在某些条件线与焊盘断裂。原则最小线宽应大于 0.5mm 。

单面板上元器件应紧贴线路板。需要架空散热的器件，要在器件与线路板之间的管脚上加套管，可起到支撑器件和增加绝缘的双重作用，要最大限度减少或避免外力冲击对焊盘与管脚连接处造成的影响，增强焊接的牢固性。线路板上重量较大的部件可增加支撑连接点，可加强与线路板间连接强度，如变压器，功率器件散热器。

单面板焊接面引脚在不影响与外壳间距的前题条件下，可留得长一些，其优点是可增加焊接部位的强度，加大焊接面积、有虚焊现象可即时发现。引脚长剪腿时，焊接部位受力较小。在台湾、日本常采用把器件引脚在焊接面弯成与线路板成45度角，然后再焊接的工艺，的其道理同上。今天谈一谈双面板设计中的一些事项，在一些要求比较高，或走线密度比较大的应用环境中采用双面印制板，其性能及各方面指标要比单面板好很多。

双面板焊盘由于孔已作金属化处理强度较高，焊环可比单面板小一些，焊盘孔孔径可比管脚直径略微大一些，因为在焊接过程中有利于焊锡溶液通过焊孔渗透到顶层焊盘，以增加焊接可靠性。但是有一个弊端，如果孔过大，波峰焊时在射流锡冲击下部分器件可能上浮，产生一些缺陷。

大电流走线的处理，线宽可按照前帖处理，如宽度不够，一般可采用在走线上镀锡增加厚度进行解决，其方法有好多种

- 1， 将走线设置成焊盘属性，这样在线路板制造时该走线不会被阻焊剂覆盖，热风整平时会被镀上锡。

- 2， 在布线处放置焊盘，将该焊盘设置成需要走线的形状，要注意把焊盘孔设置为零。

- 3， 在阻焊层放置线，此方法最灵活，但不是所有线路板生产商都会明白你的意图，需用文字说明。在阻焊层放置线的部位会不涂阻焊剂

线路镀锡的几种方法如上，要注意的是，如果很宽的的走线全部镀上锡，在焊接以后，会粘接大量焊锡，并且分布很不均匀，影响美观。一般可采用细长条镀锡宽度在1~1.5mm，长度可根据线路来确定，镀锡部分间隔0.5~1mm 双面线路板为布局、走线提供了很大的选择性，可使布线更趋于合理。关于接地，功率地与信号地一定要分开，两个地可在滤波电容处汇合，以避免大脉冲电流通过信号地连线而导致出现不稳定的意外因素，信号控制回路尽量采用一点接地法，有一个技巧，尽量把非接地的走线放置在同一布线层，最后在另外一层铺地线。输出线一般先经过滤波电容处，再到负载，输入线也必须先通过电容，再到变压器，理论依据是让纹波电流都通过滤波电容。

电压反馈取样，为避免大电流通过走线的影响，反馈电压的取样点一定要放在电源输出最末梢，以提高整机负载效应指标。

走线从一个布线层变到另外一个布线层一般用过孔连通，不宜通过器件管脚焊盘实现，因为在插装器件时有可能破坏这种连接关系，还有在每1A电流通过

时，至少应有 2 个过孔，过孔孔径原则要大于 0.5mm，一般 0.8mm 可确保加工可靠性。

器件散热，在一些小功率电源中，线路板走线也可兼散热功能，其特点是走线尽量宽大，以增加散热面积，并不涂阻焊剂，有条件可均匀放置过孔，增强导热性能。

接着谈谈铝基板在开关电源中的应用和多层印制板在开关电源电路中的应用。

铝基板由其本身构造，具有以下特点：导热性能非常优良、单面缚铜、器件只能放置在缚铜面、不能开电器连线孔所以不能按照单面板那样放置跳线。

铝基板上一般都放置贴片器件，开关管，输出整流管通过基板把热量传导出去，热阻很低，可取得较高可靠性。变压器采用平面贴片结构，也可通过基板散热，其温升比常规要低，同样规格变压器采用铝基板结构可得到较大的输出功率。铝基板跳线可以采用搭桥的方式处理。铝基板电源一般由由两块印制板组成，另外一块板放置控制电路，两块板之间通过物理连接合成一体。

由于铝基板优良的导热性，在小量手工焊接时比较困难，焊料冷却过快，容易出现问题的有一个简单实用的方法，将一个烫衣服的普通电熨斗（最好有调温功能），翻过来，熨烫面向上，固定好，温度调到 150℃左右，把铝基板放在熨斗上面，加温一段时间，然后按照常规方法将元件贴上并焊接，熨斗温度以器件易于焊接为宜，太高有可能时器件损坏，甚至铝基板铜皮剥离，温度太低焊接效果不好，要灵活掌握。

最近几年，随着多层线路板在开关电源电路中应用，使得印制线路变压器成为可能，由于多层板，层间距较小，也可以充分利用变压器窗口截面，可在主线路板上再加一到两片由多层板组成的印制线圈达到利用窗口，降低线路电流密度的目的，由于采用印制线圈，减少了人工干预，变压器一致性好，平面结构，漏感低，耦合好。开启式磁芯，良好的散热条件。由于其具有诸多的优势，有利于大批量生产，所以得到广泛的应用。但研制开发初期投入较大，不适合小规模生。

开关电源分为，隔离与非隔离两种形式，在这里主要谈一谈隔离式开关电源的拓扑形式，在下文中，非特别说明，均指隔离电源。隔离电源按照结构形式不同，可分为两大类：正激式和反激式。反激式指在变压器原边导通时副边截止，变压器储能。原边截止时，副边导通，能量释放到负载的工作状态，一般常规反激式电源单管多，双管的不常见。正激式指在变压器原边导通同时副边感应出对应电压输出到负载，能量通过变压器直接传递。按规格又可分为常规正激，包括单管正激，双管正激。半桥、桥式电路都属于正激电路。

正激和反激电路各有其特点，在设计电路的过程中为达到最优性价比，可以灵活运用。一般在小功率场合可选用反激式。稍微大一些可采用单管正激电路，中等功率可采用双管正激电路或半桥电路，低电压时采用推挽电路，与半桥工作状态相同。大功率输出，一般采用桥式电路，低压也可采用推挽电路。

反激式电源因其结构简单，省掉了一个和变压器体积大小差不多的电感，而在中小功率电源中得到广泛的应用。在有些介绍中讲到反激式电源功率只能做到几十瓦，输出功率超过 100 瓦就没有优势，实现起来有难度。本人认为一般情况下是这样的，但也不能一概而论，PI 公司的 TOP 芯片就可做到 300 瓦，有文章介绍反激电源可做到上千瓦，但没见过实物。输出功率大小与输出电压高低有关。

反激电源变压器漏感是一个非常关键的参数，由于反激电源需要变压器储存能量，要使变压器铁芯得到充分利用，一般都要在磁路中开气隙，其目的是改变铁芯磁滞回线的斜率，使变压器能够承受大的脉冲电流冲击，而不至于铁芯进入饱和非线性状态，磁路中气隙处于高磁阻状态，在磁路中产生漏磁远大于完全闭合磁路。

变压器初次极间的偶合，也是确定漏感的关键因素，要尽量使初次极线圈靠近，可采用三明治绕法，但这样会使变压器分布电容增大。选用铁芯尽量用窗口比较长的磁芯，可减小漏感，如用 EE、EF、EER、PQ 型磁芯效果要比 EI 型的好。

关于反激电源的占空比，原则上反激电源的最大占空比应该小于 0.5，否则环路不容易补偿，有可能不稳定，但有一些例外，如美国 PI 公司推出的 TOP 系列芯片是可以工作在占空比大于 0.5 的条件下。占空比由变压器原副边匝数比确定，本人对做反激的看法是，先确定反射电压（输出电压通过变压器耦合反映到原边的电压值），在一定电压范围内反射电压提高则工作占空比增大，开关管损耗降低。反射电压降低则工作占空比减小，开关管损耗增大。当然这也是有前提条件，当占空比增大，则意味着输出二极管导通时间缩短，为保持输出稳定，更多的时候将由输出电容放电电流来保证，输出电容将承受更大的高频纹波电流冲刷，而使其发热加剧，这在许多条件下是不允许的。

占空比增大，改变变压器匝数比，会使变压器漏感加大，使其整体性能变，当漏感能量大到一定程度，可充分抵消掉开关管大占空带来的低损耗，时就没有再增大占空比的意义了，甚至可能会因为漏感反峰值电压过高而击穿开关管。由于漏感大，可能使输出纹波，及其他一些电磁指标变差。当占空比小时，开关管通过电流有效值高，变压器初级电流有效值大，降低变换器效率，但可改善输出电容的工作条件，降低发热。如何确定变压器反射电压（即占空比）

有网友提到开关电源的反馈环路的参数设置，工作状态分析。由于在上学时高数学的比较差，《自动控制原理》差一点就补考了，对于这一门现在还感觉恐惧，到现在也不能完整写出闭环系统传递函数，对于系统零点、极点的概念感觉很模糊，看波德图也只是大概看出是发散还是收敛，所以对于反馈补偿不敢胡言乱语，但有有一些建议。如果有一些数学功底，再有一些学习时间可以再把大学的课本《自动控制原理》找出来仔细的消化一下，并结合实际的开关电源电路，按工作状态进行分析。

最后谈谈关于反激电源的占空比（本人关注反射电压，与占空比一致），占空比还与选择开关管的耐压有关，有一些早期的反激电源使用比较低耐压开关管，如 600V 或 650V 作为交流 220V 输入电源的开关管，也许与当时生产工艺有关，高耐压管子，不易制造，或者低耐压管子有更合理的导通损耗及开关特性，像这种线路反射电压不能太高，否则为使开关管工作在安全范围内，吸收电路损耗的功率也是相当可观的。实践证明 600V 管子反射电压不要大于 100V，650V 管子反射电压不要大于 120V，把漏感尖峰电压值钳位在 50V 时管子还有 50V 的工作余量。现在由于 MOS 管制造工艺水平的提高，一般反激电源都采用 700V 或 750V 甚至 800-900V 的开关管。像这种电路，抗过压的能力强一些开关变压器反射电压也可以做得比较高一些，最大反射电压在 150V 比较合适，能够获得较好的综合性能。PI 公司的 TOP 芯片推荐为 135V 采用瞬变电压抑制二极管钳位。但他的评估板一般反射电压都要低于这个数值在 110V 左右。这两种类型各有优缺点：

第一类：缺点抗过压能力弱，占空比小，变压器初级脉冲电流大。优点：变压器漏感小，电磁辐射低，纹波指标高，开关管损耗小，转换效率不一定比第二类低。

第二类：缺点开关管损耗大一些，变压器漏感大一些，纹波差一些。优点：抗过压能力强一些，占空比大，变压器损耗低一些，效率高一些。

反激电源反射电压还有一个确定因素

反激电源的反射电压还与一个参数有关，那就是输出电压，输出电压越低则变压器匝数比越大，变压器漏感越大，开关管承受电压越高，有可能击穿开关管、吸收电路消耗功率越大，有可能使吸收回路功率器件永久失效（特别是采用瞬变电压抑制二极管的电路）。在设计低压输出小功率反激电源的优化过程中必须小心处理，其处理方法有几个：

1、采用大一个功率等级的磁芯降低漏感，这样可提高低压反激电源的转换效率，降低损耗，减小输出纹波，提高多路输出电源的交差调整率，一般常见于家用开关电源，如光碟机、DVB 机顶盒等。

2、如果条件不允许加大磁芯，只能降低反射电压，减小占空比。降低反射电压可减小漏感但有可能使电源转换效率降低，这两者是一个矛盾，必须要有一个替代过程才能找到一个合适的点，在变压器替代实验过程中，可以检测变压器原边的反峰电压，尽量降低反峰电压脉冲的宽度，和幅度，可增加变换器的工作安全裕度。一般反射电压在 110V 时比较合适。

3、增强耦合，降低损耗，采用新的技术，和绕线工艺，变压器为满足安全规范会在原边和副边间采取绝缘措施，如垫绝缘胶带、加绝缘端空胶带。这些将影响变压器漏感性能，现实生产中可采用初级绕组包绕次级的绕法。或者次级用三重绝缘线绕制，取消初次级间的绝缘物，可以增强耦合，甚至可采用宽铜皮绕制。

文中低压输出指小于或等于 5V 的输出，像这一类小功率电源，本人的经验是，功率输出大于 20W 输出可采用正激式，可获得最佳性价比，当然这也不是绝对的，与个人的习惯，应用的环境有关系，下次谈一谈反激电源用磁性芯，磁路开气隙的一些认识，希望各位高人指点。

反激电源变压器磁芯在工作在单向磁化状态，所以磁路需要开气隙，类似于脉动直流电感器。部分磁路通过空气缝隙耦合。为什么开气隙的原理本人理解为：由于功率铁氧体也具有近似于矩形的工作特性曲线（磁滞回线），在工作特性曲线上 Y 轴表示磁感应强度（B），现在的生产工艺一般饱和点在 400mT 以上，一般此值在设计中取值应该在 200-300mT 比较合适、X 轴表示磁场强度（H）此值与磁化电流强度成比例关系。磁路开气隙相当于把磁体磁滞回线向 X 轴向倾斜，在同样的磁感应强度下，可承受更大的磁化电流，则相当于磁芯储存更多的能量，此能量在开关管截止时通过变压器次级泻放到负载电路，反激电源磁芯开气隙有两个作用。其一是传递更多能量，其二防止磁芯进入饱和状态。

反激电源的变压器工作在单向磁化状态，不仅要通过磁耦合传递能量，还担负电压变换输入输出隔离的多重作用。所以气隙的处理需要非常小心，气隙太大可使漏感变大，磁滞损耗增加，铁损、铜损增大，影响电源的整机性能。气隙太小有可能使变压器磁芯饱和，导致电源损坏

所谓反激电源的连续与断续模式是指变压器的工作状态，在满载状态变压器工作于能量完全传递，或不完全传递的工作模式。一般要根据工作环境进行设计，常规反激电源应该工作在连续模式，这样开关管、线路的损耗都比较小，而且可以减轻输入输出电容的工作应力，但是这也有一些例外。需要在这里特别指出：由于反激电源的特点也比较适合设计成高压电源，而高压电源变压器一般工作在断续模式，本人理解为由于高压电源输出需要采用高耐压的整流二极管。由于制造工艺特点，高反压二极管，反向恢复时间长，速度低，在电流连续状态，二极管是在有正向偏压时恢复，反向恢复时的能量损耗非常大，不利于变换器性能的提高，轻则降低转换效率，整流管严重发热，重则甚至烧毁整流管。由于在断续模式下，二极管是在零偏压情况下反向偏置，损耗可以降到一个比较低的水平。所以高压电源工作在断续模式，并且工作频率不能太高。还有一类反激式电源工作在临界状态，一般这类电源工作在调频模式，或调频调宽双模式，一些低成本的自激电源（RCC）常采用这种形式，为保证输出稳定，变压器工作频率随着，输出电流或输入电压而改变，接近满载时变压器始终保持在连续与断续之间，这种电源只适合于小功率输出，否则电磁兼容特性的处理会很让人头痛

反激开关电源变压器应工作在连续模式，那就要求比较大的绕组电感量，当然连续也是有一定程度的，过分追求绝对连续是不现实的，有可能需要很大的磁芯，非常多的线圈匝数，同时伴随着大的漏感和分布电容，可能得不偿失。那么如何确定这个参数呢，通过多次实践，及分析同行的设计，本人认为，在标称电压输入时，输出达到 50%~60%变压器从断续，过渡到连续状态比较合适。或者在最高输入电压状态时，满载输出时，变压器能够过渡到连续状态就可以了。