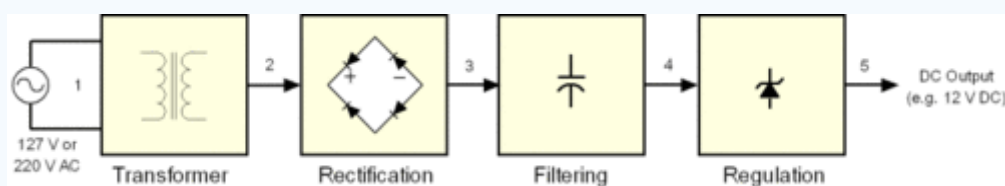


开关电源工作原理详细解析

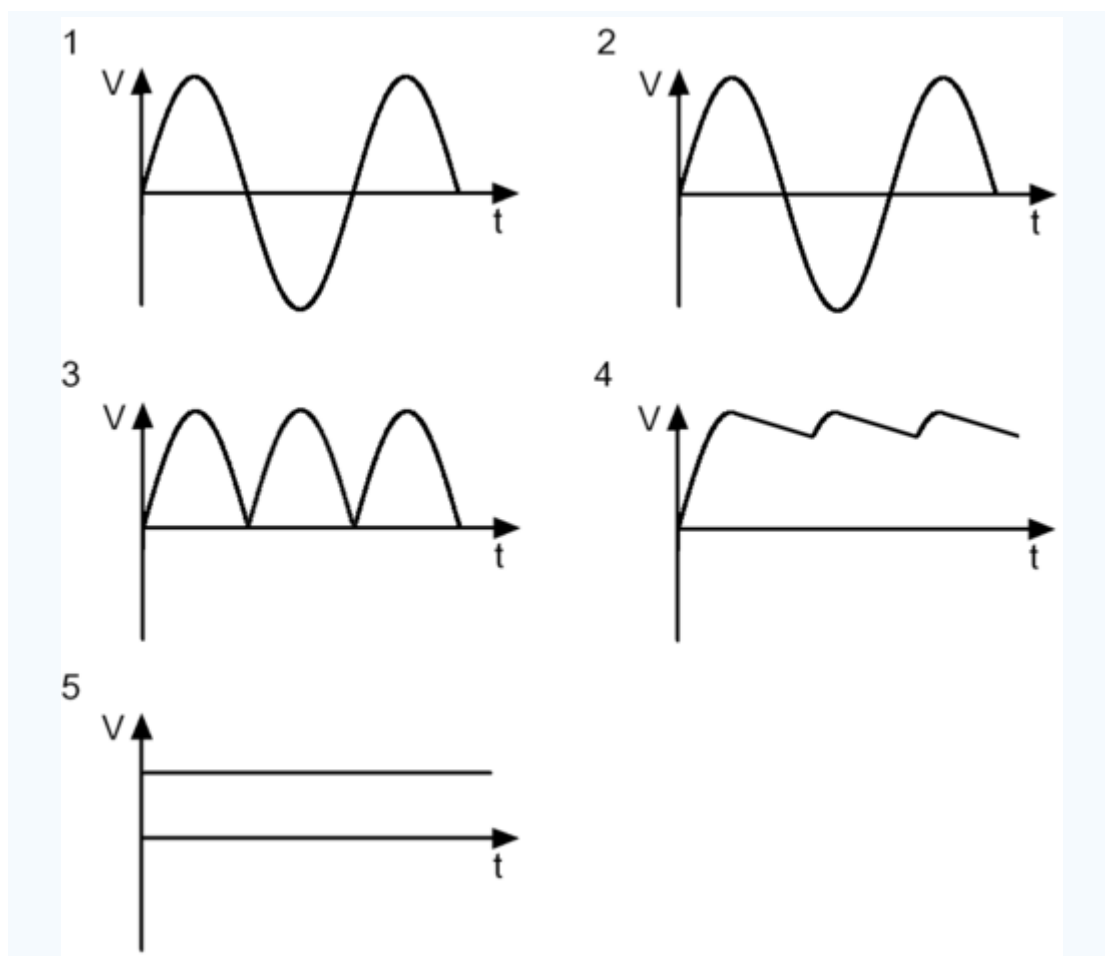
个人 PC 所采用的电源都是基于一种名为“开关模式”的技术，所以我们经常会将个人 PC 电源称之为——开关电源（Switching Mode Power Supplies，简称 SMPS），它还有一个绰号——DC-DC 转化器。本次文章我们将会为您解读开关电源的工作模式和原理、开关电源内部的元器件的介绍以及这些元器件的功能。

●线性电源知多少

目前主要包括两种电源类型：线性电源（linear）和开关电源（switching）。线性电源的工作原理是首先将 127 V 或者 220 V 市电通过变压器转为低压电，比如说 12V，而且经过转换后的低压依然是 AC 交流电；然后再通过一系列的二极管进行矫正和整流，并将低压 AC 交流电转化为脉动电压（配图 1 和 2 中的“3”）；下一步需要对脉动电压进行滤波，通过电容完成，然后将经过滤波后的低压交流电转换成 DC 直流电（配图 1 和 2 中的“4”）；此时得到的低压直流电依然不够纯净，会有一定的波动（这种电压波动就是我们常说的纹波），所以还需要稳压二极管或者电压整流电路进行矫正。最后，我们就可以得到纯净的低压 DC 直流电输出了（配图 1 和 2 中的“5”）



配图 1：标准的线性电源设计图



配图 2：线性电源的波形

尽管说线性电源非常适合为低功耗设备供电，比如说无绳电话、PlayStation/Wii/Xbox 等游戏主机等等，但是对于高功耗设备而言，线性电源将会力不从心。

对于线性电源而言，其内部电容以及变压器的大小和 AC 市电的频率成反比：也即说如果输入市电的频率越低时，线性电源就需要越大的电容和变压器，反之亦然。由于当前一直采用的是 60Hz（有些国家是 50Hz）频率的 AC 市电，这是一个相对较低的频率，所以其变压器以及电容的个头往往都相对比较大。此外，AC 市电的浪涌越大，线性电源的变压器的个头就越大。

由此可见，对于个人 PC 领域而言，制造一台线性电源将会是一件疯狂的举动，因为它的体积将会非常大、重量也会非常的重。所以说个人 PC 用户并不适合用线性电源。

●开关电源知多少

开关电源可以通过高频开关模式很好的解决这一问题。对于高频开关电源而言，AC 输入电压可以在进入变压器之前升压（升压前一般是 50-60 KHz）。随着输入电压的升高，变压器以及电容等元器件的个头就不用像线性电源那么的大。这种高频开关电源正是我们的个人 PC 以及像 VCR 录像机这样的设备所需要的。需要说明的是，我们经常所说的“开关电源”其实是“高频开关电源”的缩写形式，和电源本身的关闭和开启式没有任何关系的。

事实上，终端用户的 PC 的电源采用的是一种更为优化的方案：闭回路系统（closed loop system）——负责控制开关管的电路，从电源的输出获得反馈信号，然后根据 PC 的功耗来增加或者降低某一周期内的电压的频率以便能够适应电源的变压器（这个方法称作 PWM，Pulse Width Modulation，脉冲宽度调制）。所以说，开关电源可以根据与之相连的耗电设备的功耗的大小来自我调整，从而可以让变压器以及其他的元器件带走更少量的能量，而且降低发热量。

反观线性电源，它的设计理念就是功率至上，即便负载电路并不需要很大电流。这样做的后果就是所有元件即便非必要的时候也工作在满负荷下，结果产生高很多的热量。

下图 3 和 4 描述的是开关电源的 PWM 反馈机制。图 3 描述的是没有 PFC (Power Factor Correction, 功率因素校正) 电路的廉价电源，图 4 描述的是采用主动式 PFC 设计的中高端电源。

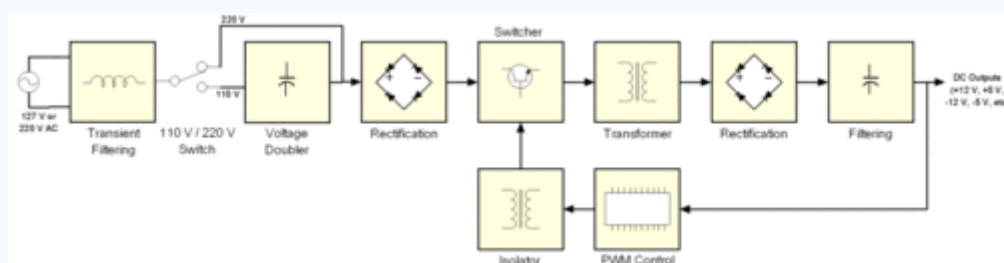


图 3：没有 PFC 电路的电源

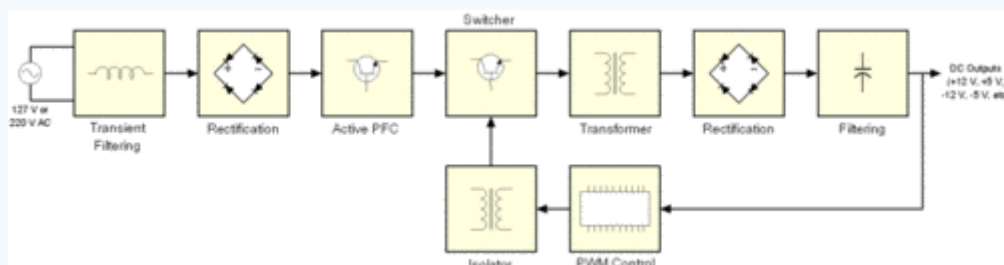


图 4：有 PFC 电路的电源

通过图 3 和图 4 的对比我们可以看出两者的不同之处：一个具备主动式 PFC 电路而另一个不具备，前者没有 110/220 V 转换器，而且也没有电压倍压电路。下文我们的重点将会是主动式 PFC 电源的讲解。

为了让读者能够更好的理解电源的工作原理，以上我们提供的是非常基本的图解，图中并未包含其他额外的电路，比如说短路保护、待机电路以及 PG 信号发生器等。当然了，如果您还想了解一下更加详尽的图解，请看图 5。如果看不懂也没关系，因为这张图本来就是为那些专业电源设计人员看的。

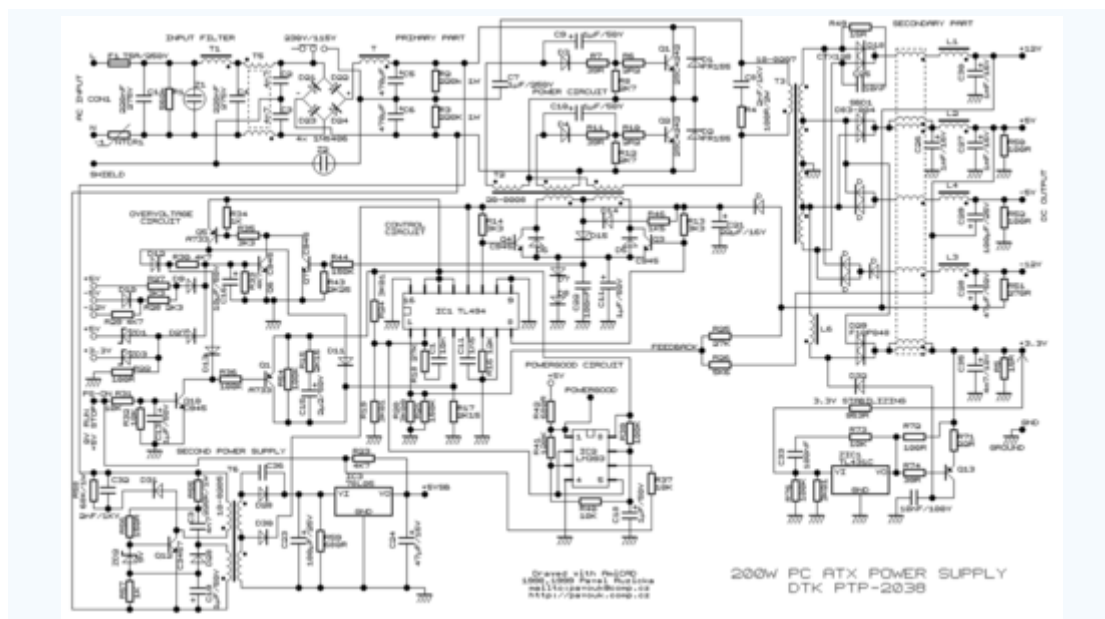


图 5：典型的低端 ATX 电源设计图

你可能会问，图 5 设计图中为什么没有电压整流电路？事实上，PWM 电路已经肩负起了电压整流的工作。输入电压在经过开关管之前将会再次校正，而且进入变压器的电压已经成为方形波。所以，变压器输出的波形也是方形波，而不是正弦波。由于此时波形已经是方形波，所以电压可以轻而易举的被变压器转换为 DC 直流电压。也就是说，当电压被变压器重新校正之后，输出电压已经变成了 DC 直流电压。这就是为什么很多时候开关电源经常会被称之为 DC-DC 转换器。

馈送 PWM 控制电路的回路负责所有需要的调节功能。如果输出电压错误时，PWM 控制电路就会改变工作周期的控制信号以适应变压器，最终将输出电压校正过来。这种情况经常会发生在 PC 功耗升高的时，此时输出电压趋于下降，或者 PC 功耗下降的时，此时输出电压趋于上升。

在看下一页是，我们有必要了解一下以下信息：

★在变压器之前的所有电路及模块称为“primary”（一次侧），在变压器之后的所有电路及模块称为“secondary”（二次侧）；

★采用主动式 PFC 设计的电源不具备 110 V / 220 V 转换器，同时也没有电压倍压器；

★对于没有 PFC 电路的电源而言，如果 110 V / 220 V 被设定为 110 V 时，电流在进入整流桥之前，电源本身将会利用电压倍压器将 110 V 提升至 220 V 左右；

★PC 电源上的开关管由一对功率 MOSFET 管构成，当然也有其他的组合方式，之后我们将会详解；

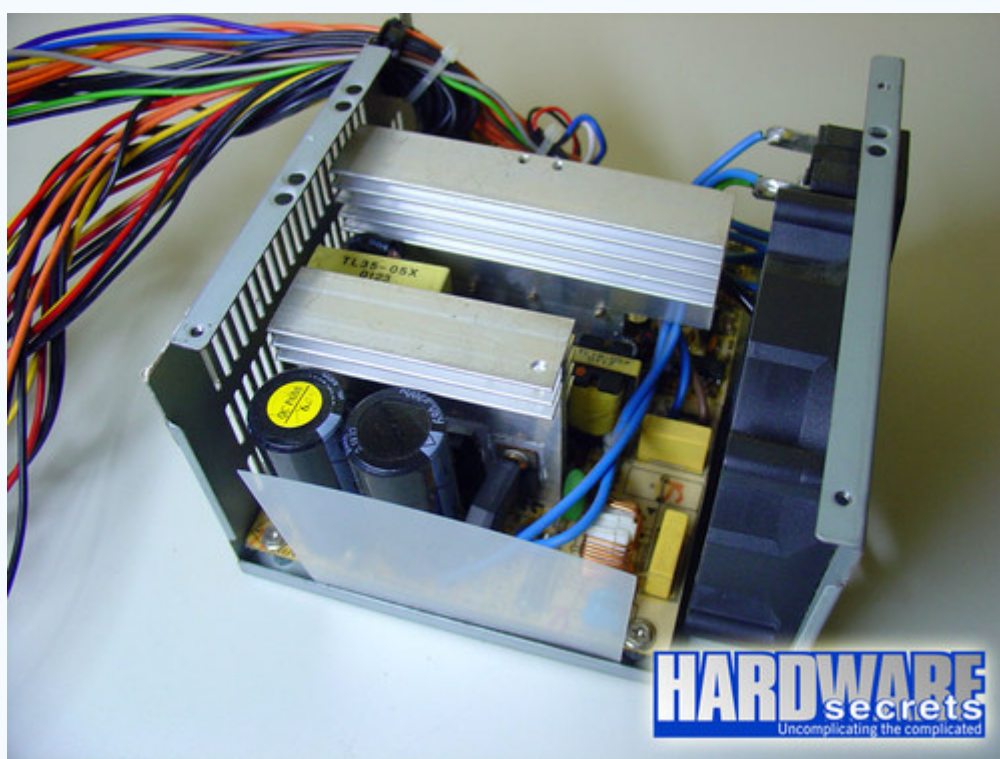
★变压器所需波形为方形波，所以通过变压器后的电压波形都是方形波，而非正弦波；

★PWM 控制电流往往都是集成电路，通常是通过一个小的变压器与一次侧隔离，而有时候也可能是通过耦合芯片（一种很小的带有 LED 和光电晶体管的 IC 芯片）和一次侧隔离；

★PWM 控制电路是根据电源的输出负载情况来控制电源的开关管的闭合的。如果输出电压过高或者过低时，PWM 控制电路将会改变电压的波形以适应开关管，从而达到校正输出电压的目的；

下一页我们将通过图片来研究电源的每一个模块和电路，通过实物图形象的告诉你在电源中何处能找到它们。

当你第一次打开一台电源后（确保电源线没有和市电连接，否则会被电到），你可能会被里面那些奇奇怪怪的元器件搞得晕头转向，但是有两样东西你肯定认识：电源风扇和散热片。



开关电源内部

但是您应该很容易就能分辨出电源内部哪些元器件属于一次侧，哪些属于二次侧。一般来讲，如果你看到一个（采用主动式 PFC 电路的电源）或者两个（无 PFC 电路的电源）很大的滤波电容的话，那一侧就是一次侧。

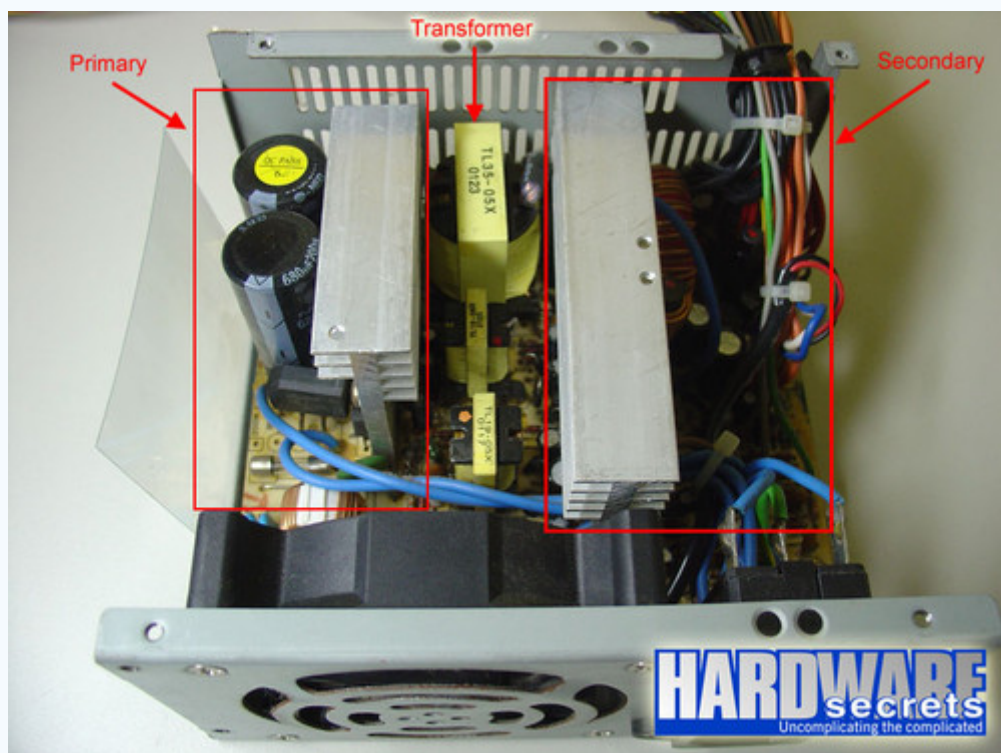
一般情况下，再电源的两个散热片之间都会安排 3 个变压器，比如说图 7 所示，主变压器是最大个的那颗；中等“体型”的那颗往往负责+5VSB 输出，而最小的那颗一般用于 PWM 控制电路，主要用于隔离一次侧和二次侧部分（这也是为什么在上文图 3 和图 4 中的变压器上贴着“隔离器”的标签）。有些电源并不把变压器当“隔离器”来用，而是采用一颗或者多颗光耦（看起来像是 IC 整合芯片），也即说采用这种设计方案的电源只有两个变压器——主变压器和辅变压器。

电源内部一般都有两个散热片，一个属于一次侧，另一个属于二次侧。如果是一台主动式 PFC 电源，那么它的在一次侧的散热片上，你可以看到开关管、PFC 晶体管以及二极管。这也不是绝对的，因为也有些厂商可能会选择将主动式 PFC 组件安装到独立的散热片上，此时在一次侧会有两个散热片。

在二次侧的散热片上，你会发现有一些整流器，它们看起来和三极管有点像，但事实上，它们都是有两颗功率二极管组合而成的。

在二次侧的散热片旁边，你还会看到很多电容和电感线圈，共同组成了低压滤波模块——找到它们也就找到了二次侧。

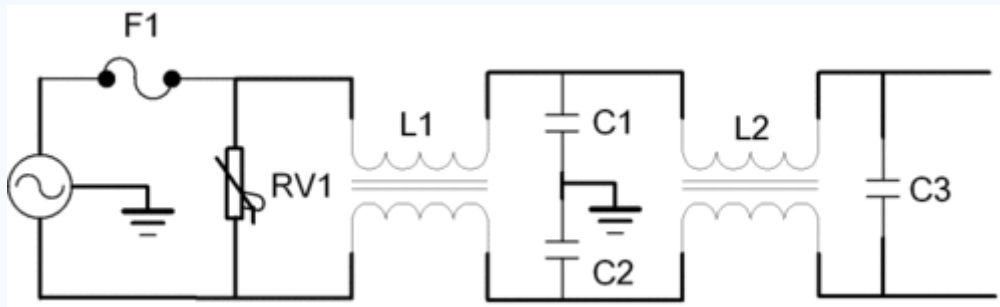
区分一次侧和二次侧更简单的方法就是跟着电源的线走。一般来讲，与输出线相连的往往是二次侧，而与输入线相连的是一次侧（从市电接入的输入线）。如图 7 所示。



区分一次侧和二次侧

以上我们从宏观的角度大致介绍了一下电源内部的各个模块。下面我们细化一下，将话题转移到电源各个模块的元器件上来……

市电接入 PC 开关电源之后，首先进入瞬变滤波电路（Transient Filtering），也就是我们常说的 EMI 电路。下图 8 描述的是一台 PC 电源的“推荐的”瞬变滤波电路的电路图。



瞬变滤波电路的电路图

为什么要强调是“推荐的”呢？因为市面上很多电源，尤其是低端电源，往往会省去图 8 中的一些元器件。所以说通过检查 EMI 电路是否有缩水就可以来判断你的电源品质的优劣。

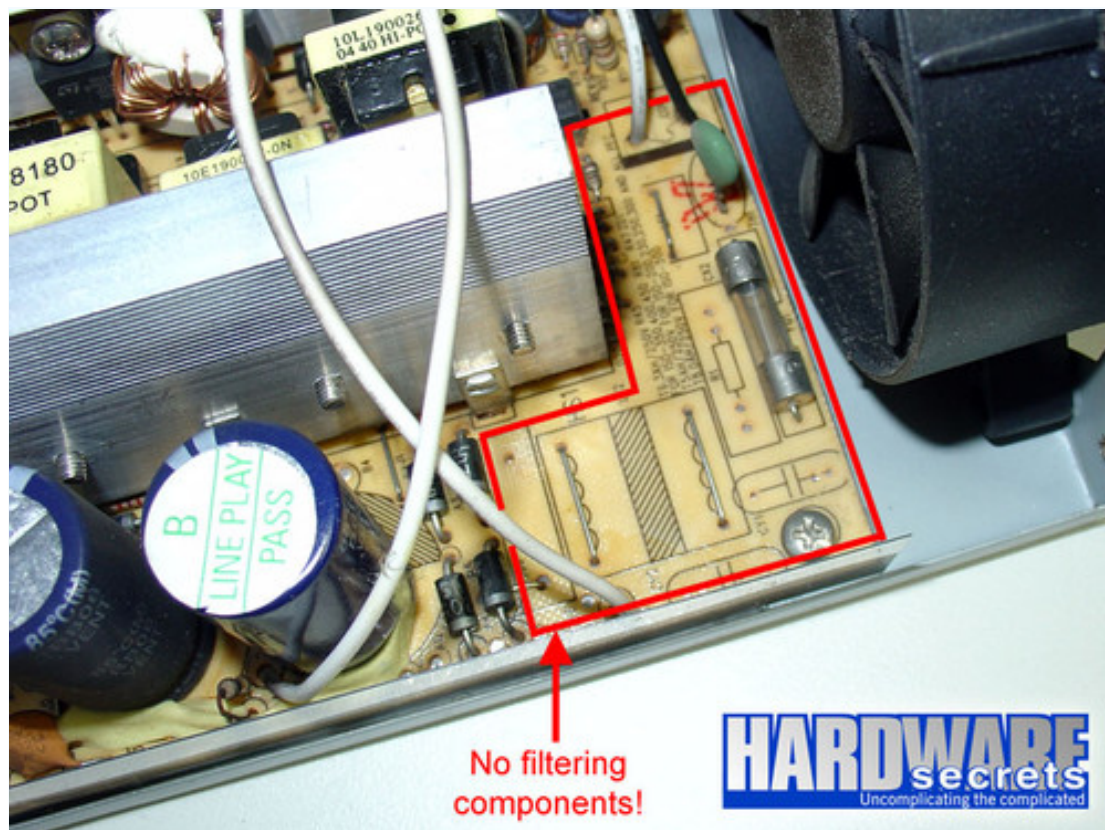
EMI 电路电路的主要部件是 MOV (Metal Oxide Varistor, 金属氧化物压敏电阻)，或者压敏电阻（图 8 中 RV1 所示），负责抑制市电瞬变中的尖峰。MOV 元件同样被用在浪涌抑制器上 (surge suppressors)。尽管如此，许多低端电源为了节省成本往往会砍掉重要的 MOV 元件。对于配备 MOV 元件电源而言，有无浪涌抑制器已经不重要了，因为电源已经有了抑制浪涌的功能。

图 8 中的 L1 and L2 是铁素体线圈；C1 and C2 为圆盘电容，通常是蓝色的，这些电容通常也叫“Y”电容；C3 是金属化聚酯电容，通常容量为 100nF、470nF 或 680nF，也叫“X”电容；有些电源配备了两颗 X 电容，和市电并联相接，如图 8 RV1 所示。

X 电容可以任何一种和市电并联的电容；Y 电容一般都是两两配对，需要串联连接到火、零之间并将两个电容的中点通过机箱接地。也就是说，它们是和市电并联的。

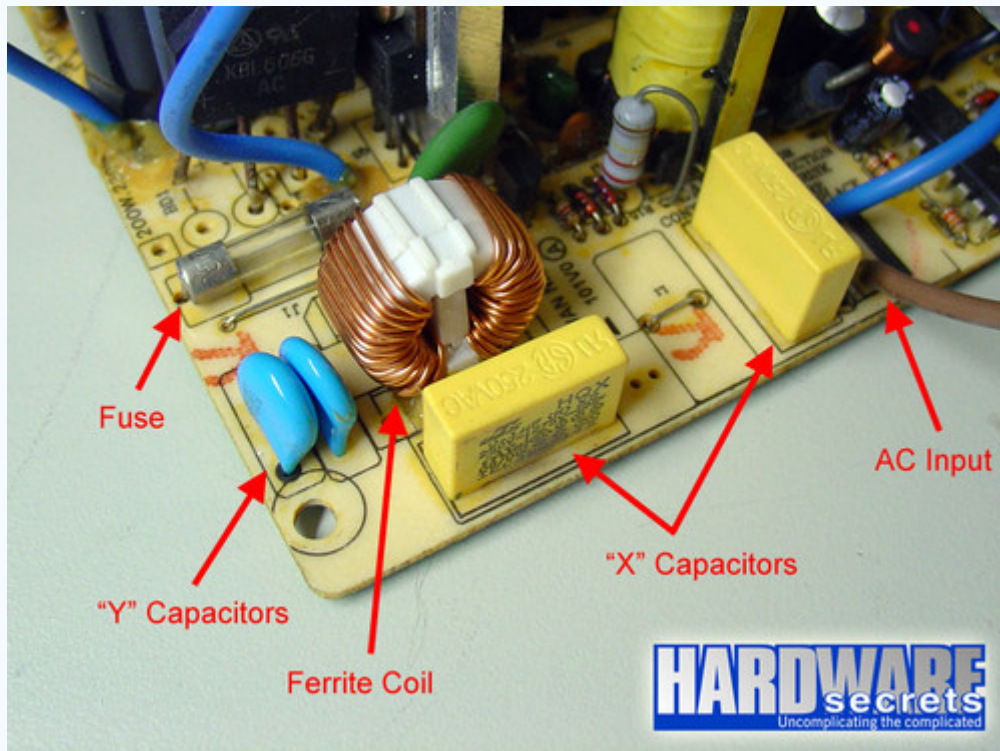
瞬变滤波电路不仅可以起到给市电滤波的作用，而且可以阻止开关管产生的噪声干扰到同在一根市电上的其他电子设备。

一起来看几个实际的例子。如图 9 所示，你能看到一些奇怪之处吗？这个电源居然没有瞬变滤波电路！这是一款低廉的“山寨”电源。请注意，看看电路板上的标记，瞬变滤波电路本来应该有才对，但是却被丧失良知的黑心 JS 们带到了市场里。



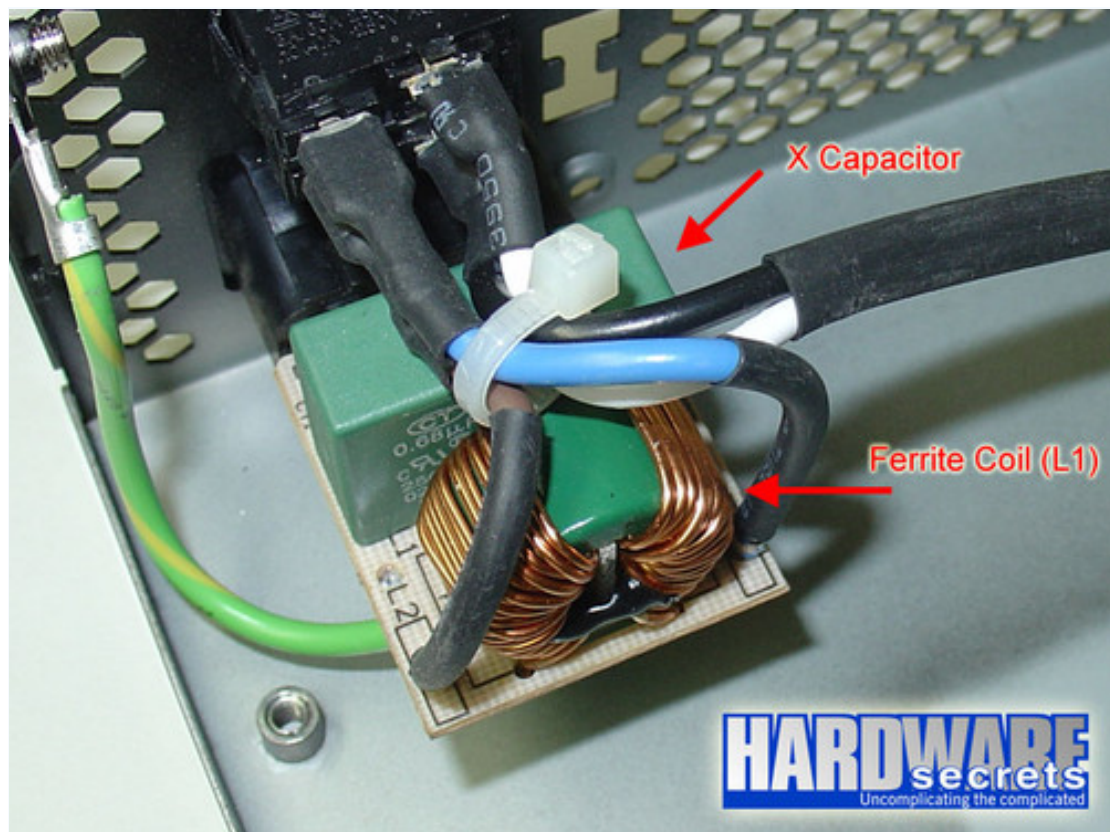
这款低廉的“山寨”电源没有瞬变滤波电路

再看图 10 实物所示，这是一款具备瞬变滤波电路的低端电源，但是正如我们看到的那样，这款电源的瞬变滤波电路省去了重要的 MOV 压敏电阻，而且只有一个铁素体线圈；不过这款电源配备了一个额外的 X 电容。



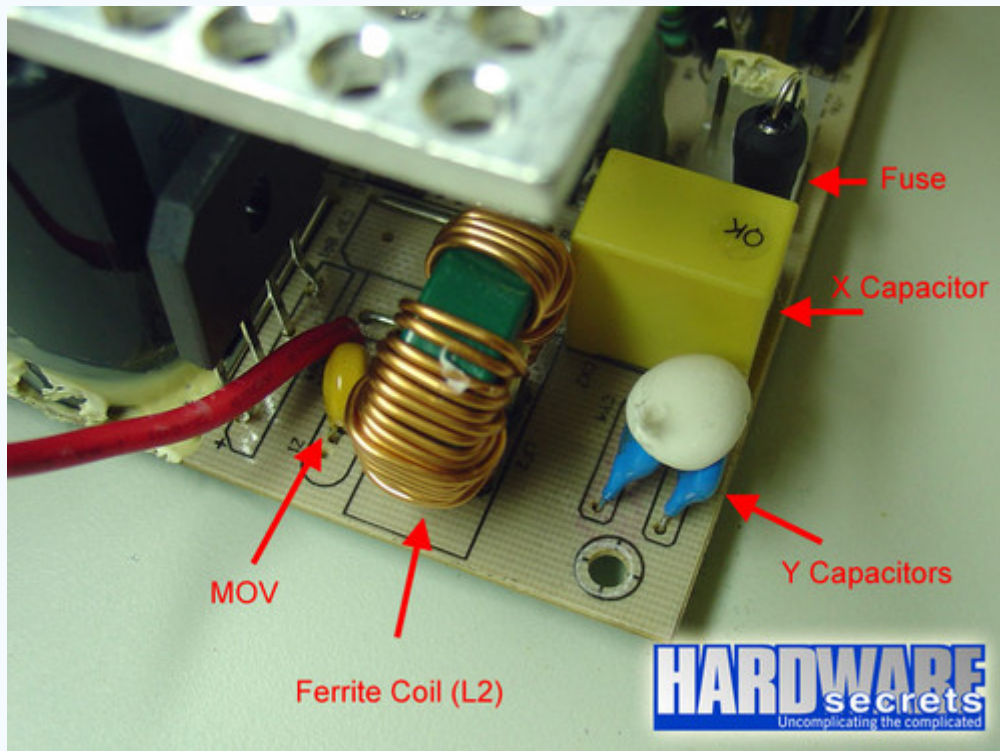
低端电源的 EMI 电路

瞬变滤波电路分为一级 EMI 和二级 EMI，很多电源的一级 EMI 往往会被安置在一个独立的 PCB 板上，靠近市电接口部分，二级 EMI 则被安置在电源的主 PCB 板上，如下图 11 和 12 所示。



一级 EMI 配备了一个 X 电容和一个铁素体电感

再看这款电源的二级 EMI。在这里我们能看到 MOV 压敏电阻，尽管它的安置位置有点奇怪，位于第二个铁素体的后面。总体而言，应该说这款电源的 EMI 电路是非常完整的。



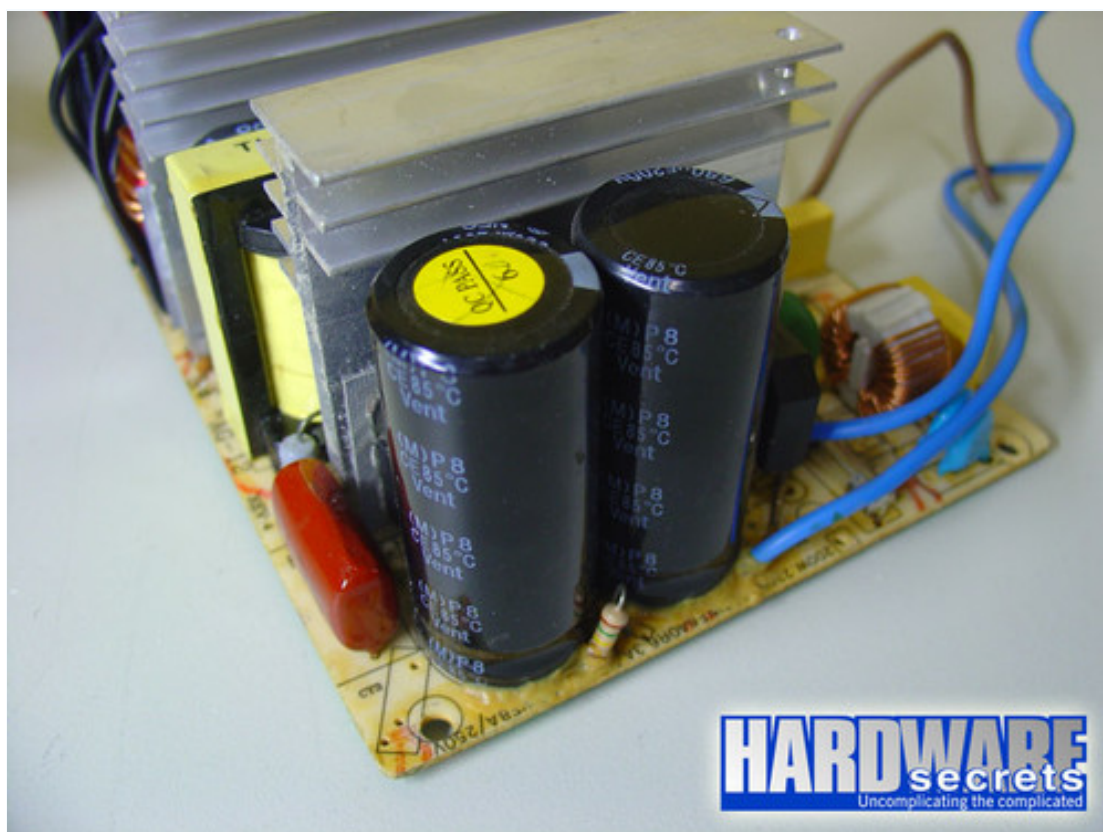
完整的二级 EMI

值得一提的是，以上这款电源的 MOV 压敏电阻是黄色的，但是事实上大部分 MOV 都是深蓝色的。

此外，这款电源的瞬变滤波电路还配备了保险管（图 8 中 F1 所示）。需要注意了，如果你发现保险管内的保险丝已经烧断了，那么可以肯定的是，电源内部的某个或者某些元器件是存在缺陷的。如果此时更换保险管的话是没有用的，当你开机之后很可能再次被烧断。

●倍压器和一次侧整流电路

上文已经说过，开关电源主要包括主动式 PFC 电源和被动式 PFC 电源，后者没有 PFC 电路，但是配备了倍压器（voltage doubler）。倍压器采用两颗巨大的电解电容，也就是说，如果你在电源内部看到两颗大号电容的话，那基本可以判断出这就是电源的倍压器。前面我们已经提到，倍压器只适合于 127V 电压的地区。

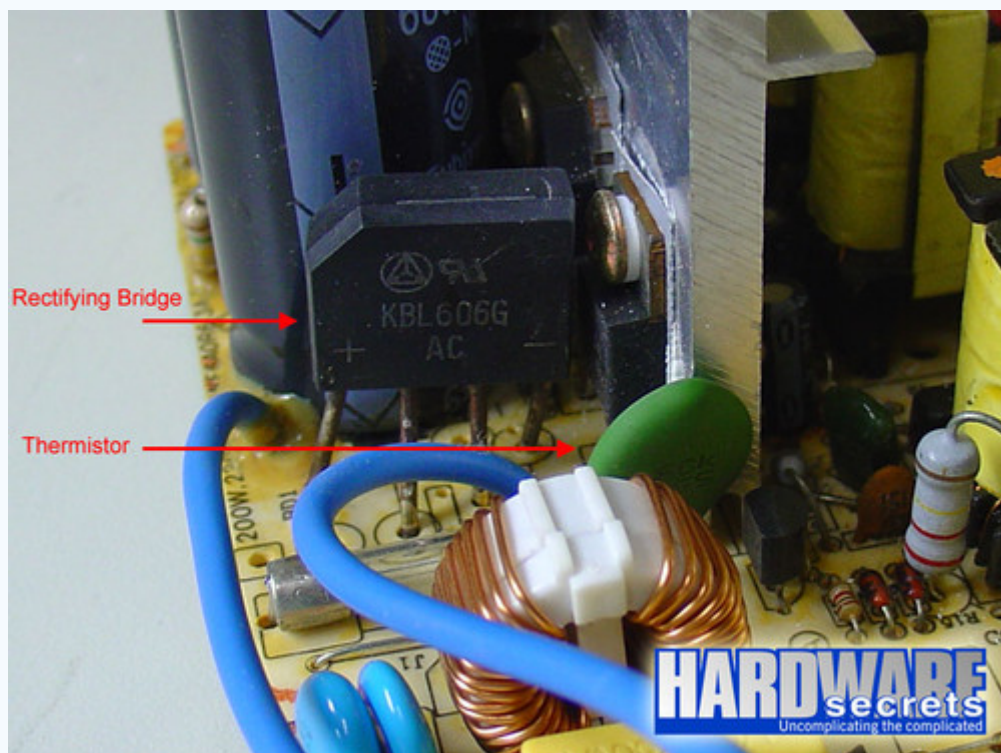


两颗巨大的电解电容组成的倍压器



拆下来看看

在倍压器的一侧可以看到整流桥。整流桥可以由 4 颗二极管组成，也可以是有单个元器件组成，如图 15 所示。高端电源的整流桥一般都会安置在专门的散热片上。

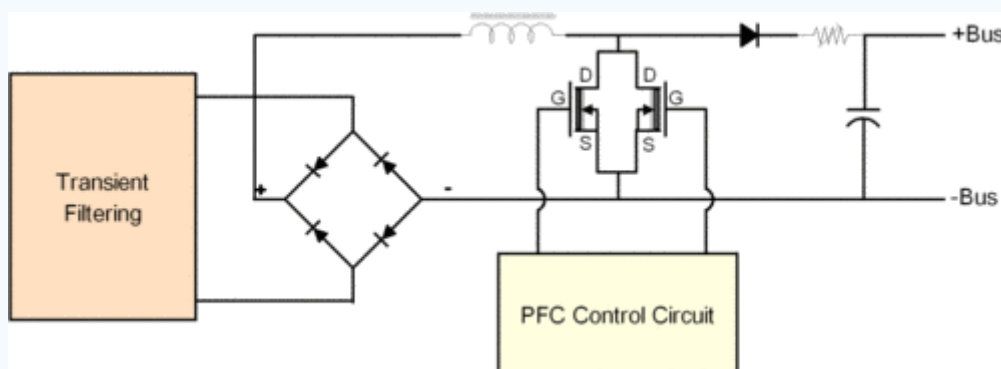


整流桥

在一次侧部分通常还会配备一个 NTC 热敏电阻——一种可以根据温度的变化改变电阻值的电阻器。NTC 热敏电阻是 Negative Temperature Coefficient 的缩写形式。它的作用主要是用来当温度很低或者很高时重新匹配供电，和陶瓷圆盘电容比较相似，通常是橄榄色。

●主动式 PFC 电路

毫无疑问，这种电路仅可以在配有主动 PFC 电路的电源中才能看到。图 16 描述的正是典型的 PFC 电路：



主动式 PFC 电路图

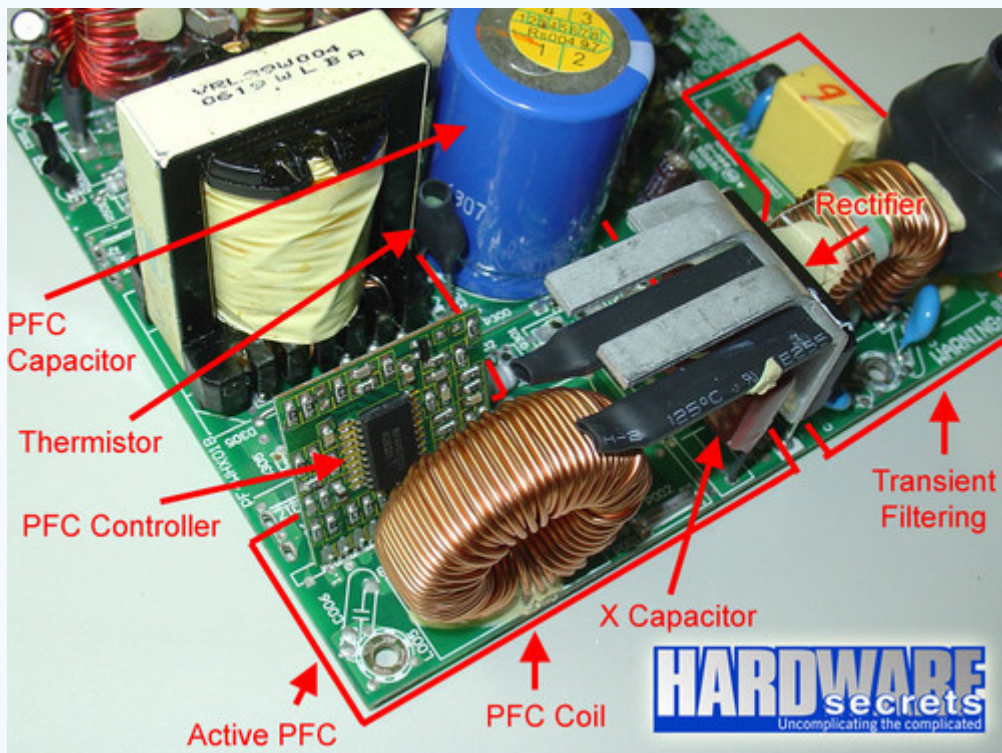
主动式 PFC 电路通常使用两个功率 MOSFET 开关管。这些开关管一般都会安置在一次侧的散热片上。为了易于理解，我们用在字母标记了每一颗 MOSFET 开关管：S 表示源极（Source）、D 表示漏极（Drain）、G 表示栅极（Gate）。

PFC 二极管是一颗功率二极管，通常采用的是和功率晶体管类似的封装技术，两者长的很像，同样被安置在一次侧的散热片上，不过 PFC 二极管只有两根针脚。

PFC 电路中的电感是电源中最大的电感；一次侧的滤波电容是主动式 PFC 电源一次侧部分最大的电解电容。图 16 中的电阻器是一颗 NTC 热敏电阻，可以更加温度的变化而改变电阻值，和二级 EMI 的 NTC 热敏电阻起相同的作用。

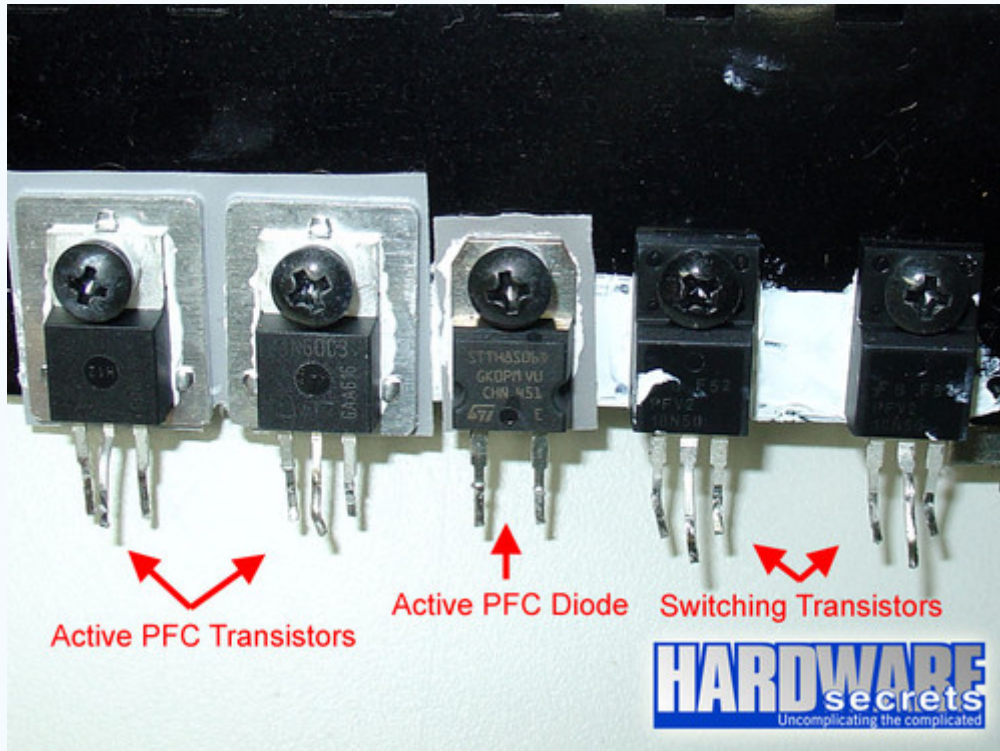
主动式 PFC 控制电路通常基于一颗 IC 整合电路，有时候这种整合电路同时会负责控制 PWM 电路（用于控制开关管的闭合）。这种整合电路通常被称为 “PFC/PWM combo”。

照旧，先看一些实例。在图 17 中，我们将一次侧的散热片去除之后可以更好的看到元器件。左侧是瞬变滤波电路的二级 EMI 电路，上文已经详细介绍过；再看左侧，全部都是主动式 PFC 电路的组件。由于我们已经将散热片去除，所以在图片上已经看不到 PFC 晶体管以及 PFC 二极管了。此外，稍加留意的话可以看到，在整流桥和主动式 PFC 电路之间有一个 X 电容（整流桥散热片底部的棕色元件）。通常情况下，外形酷似陶制圆盘电容的橄榄色热敏电阻都会有橡胶皮包裹。



主动式 PFC 元器件

图 18 是一次侧散热片上的元件。这款电源配备了两个 MOSFET 开关管和主动式 PFC 电路的功率二极管：



开关管、功率二极管

下面我们将重点介绍开关管……

●开关管

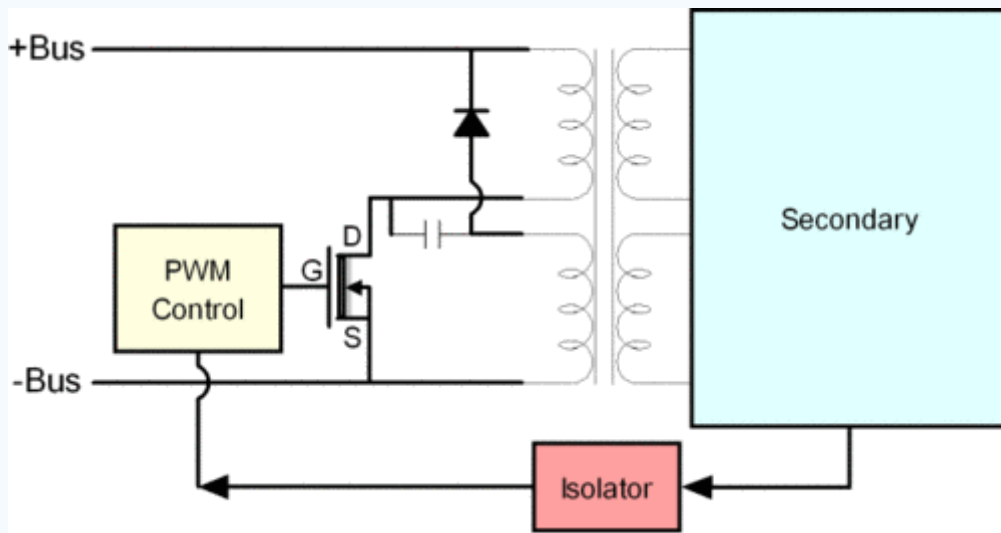
开关电源的开关逆变级可以有多种模式，我们总结了一下几种情况：

模式	开关管数量	二极管数量	电容数量	变压器引脚
单端正激	1	1	1	4
双管正激	2	2	0	2
半桥	2	0	2	2
全桥	4	0	0	2
推挽	2	0	0	3

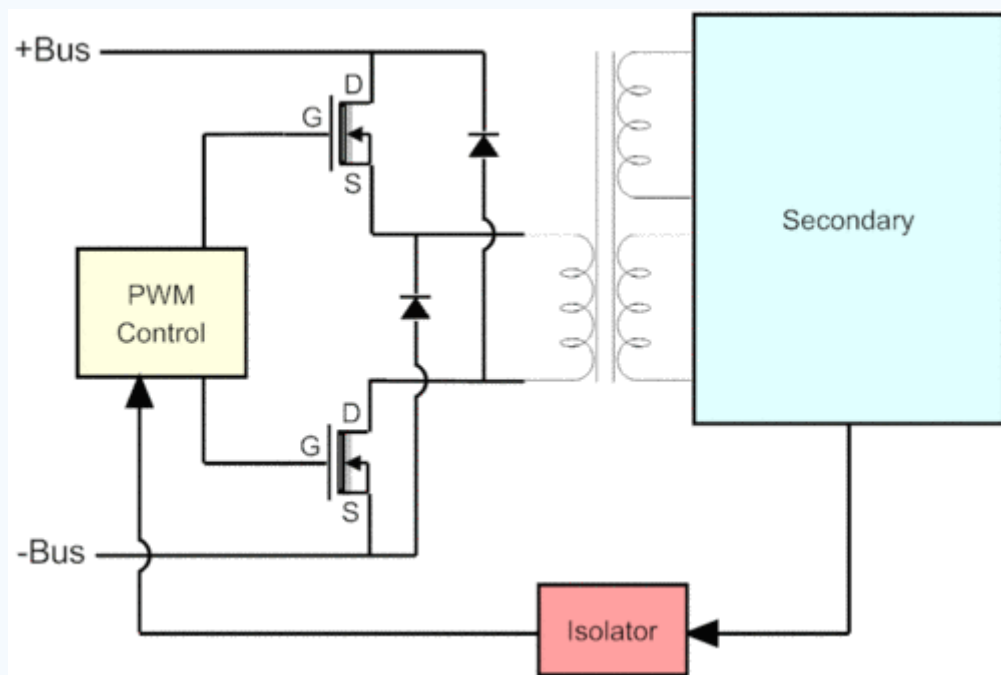
当然了，我们只是分析某种模式下到底需要多少元器件，事实上当工程师们在考虑采用哪种模式时还会收到很多因素制约。

目前最流行的两种模式是双管正激（two-transistor forward）和全桥式（push-pull）设计，两者均使用了两颗开关管。这些被安置在一次侧散热片上的开关管我们已经在上一页有所介绍，这里就不做过赘述。

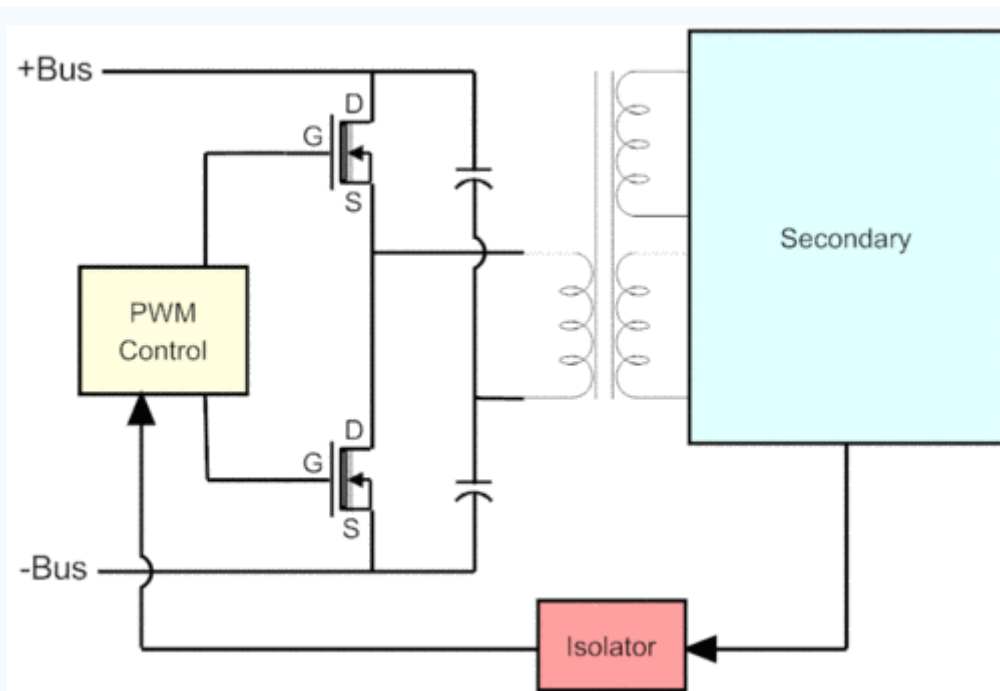
以下是这五种模式的设计图：



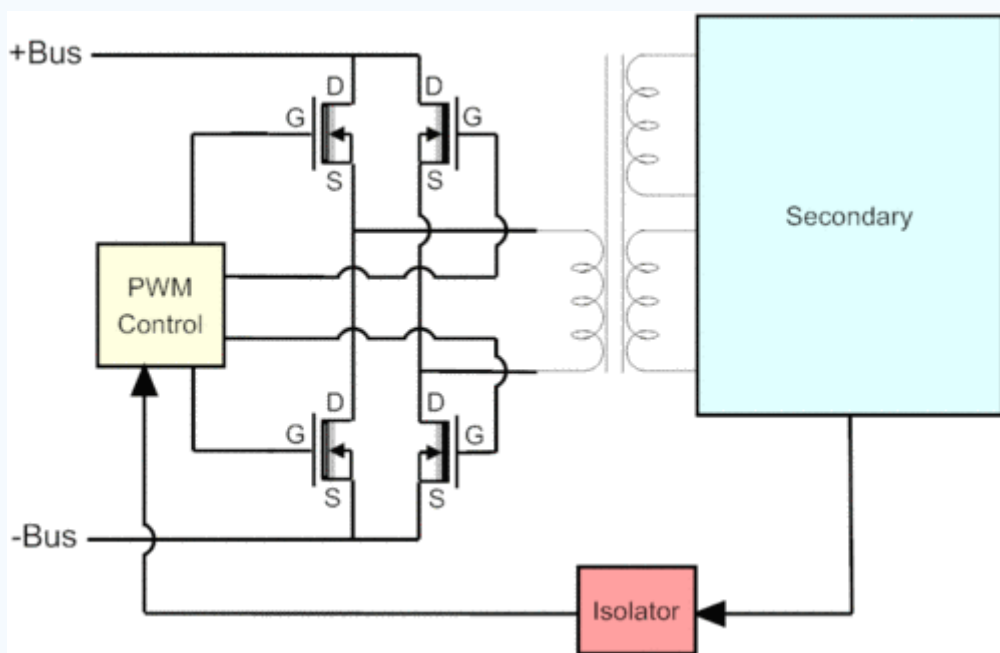
单端正激 (Single-transistor forward configuration)



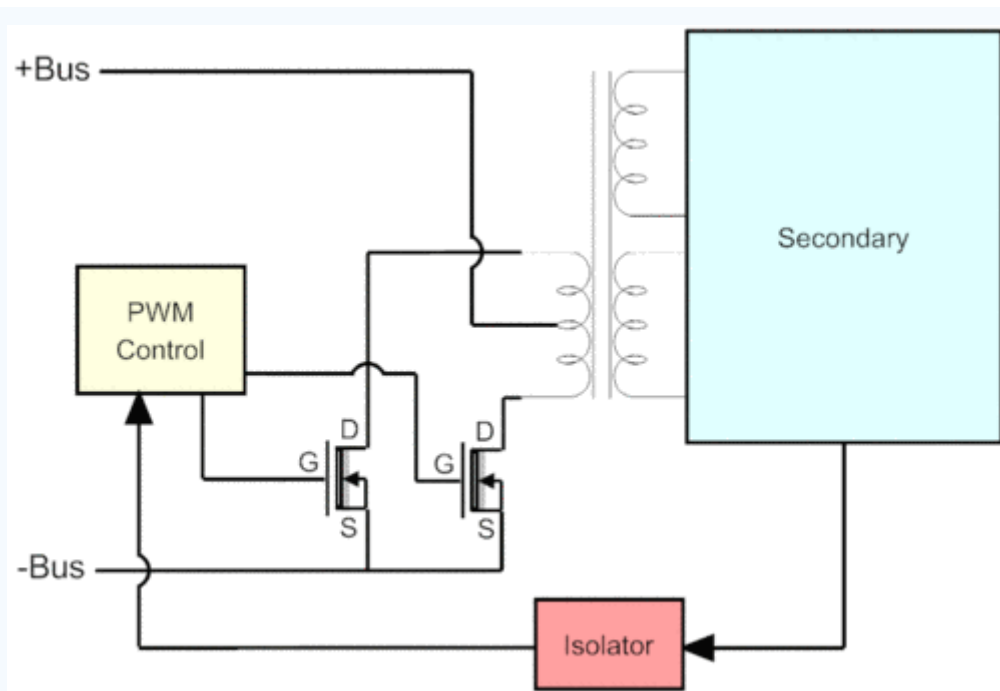
双管正激 (Two-transistor forward configuration)



半桥 (Half bridge configuration)



全桥 (Full bridge configuration)



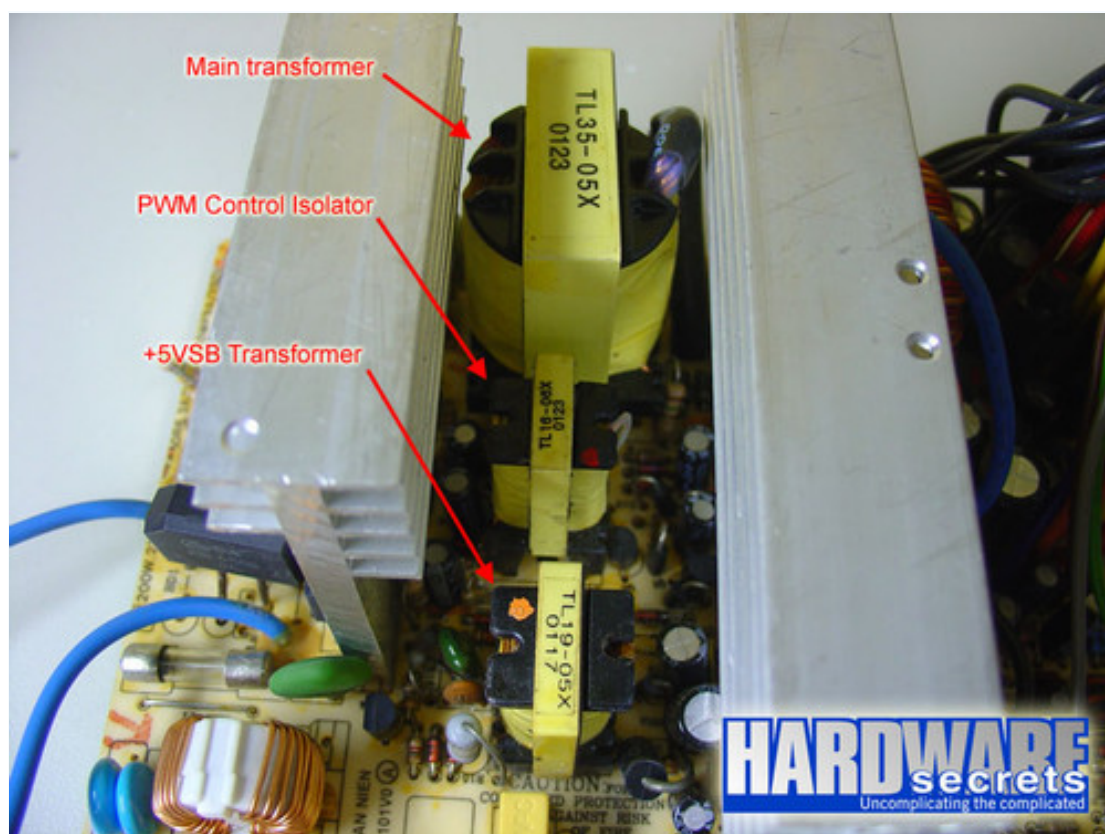
推挽（Push-pull configuration）

●变压器和 PWM 控制电路

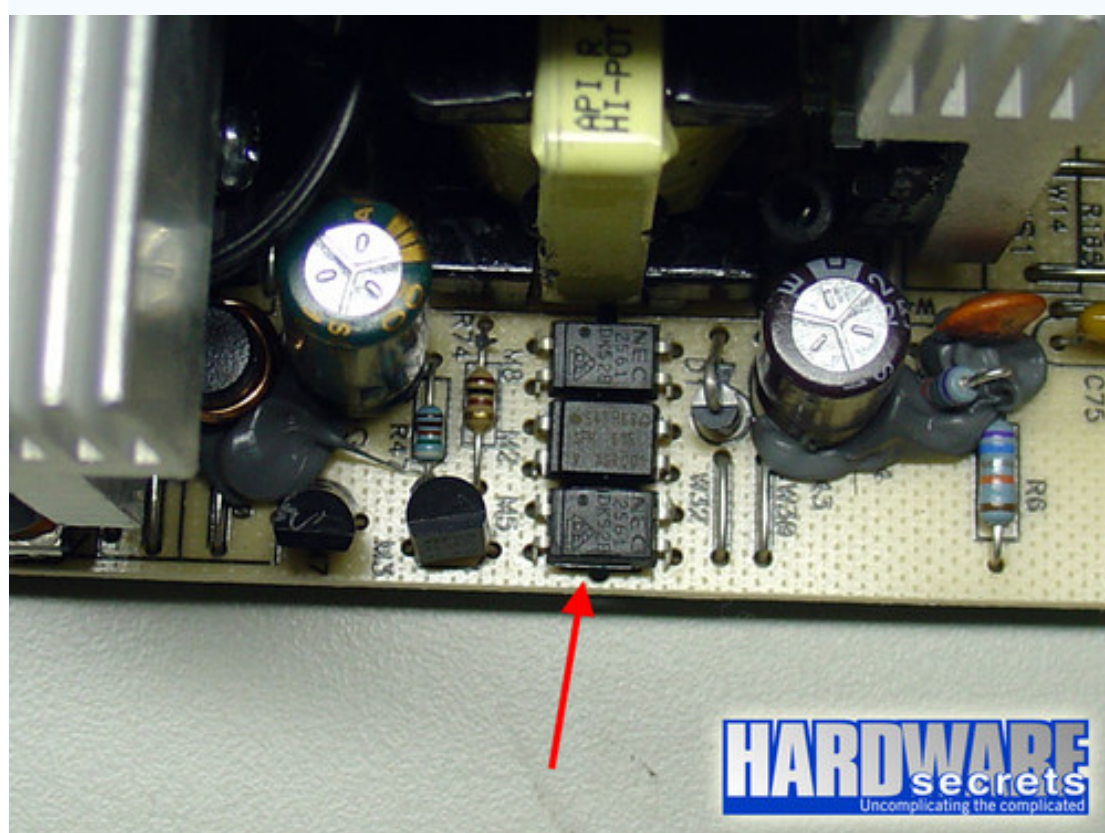
先前我们已经提到，一台 PC 电源一般都会配备 3 个变压器：个头最大的那颗是之前图 3、4 和图 19-23 上标示出来的主变压器，它的一次侧与开关管相连，二次侧与整流电路与滤波电路相连，可以提供电源的低压直流输出（+12V，+5V，+3.3V，-12V，-5V）。

最小的那颗变压器负载+5VSB 输出，通常也成为待机变压器，随时处于“待命状态”，因为这部分输出始终是开启的，即便是 PC 电源处于关闭状态也是如此。

第三个变压器是隔离器，将 PWM 控制电路和开关管相连。并不是所有的电源都会装备这个变压器，因为有些电源往往会配备具备相同功能的光耦整合电路。

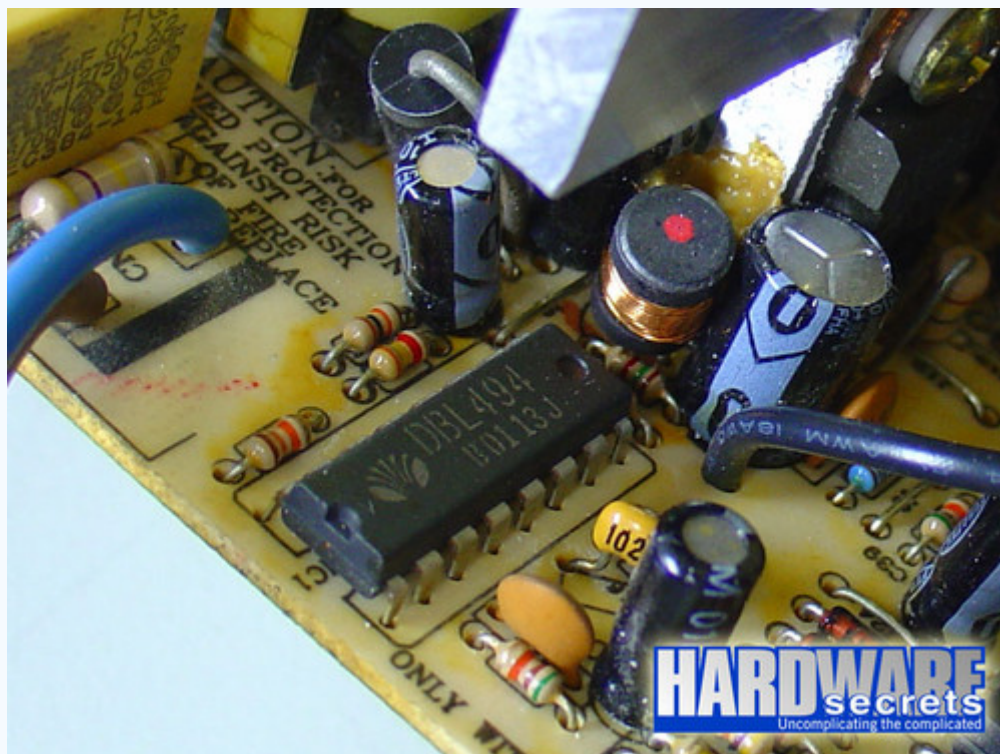


变压器



这台电源采用的是光耦整合电路，而不是变压器

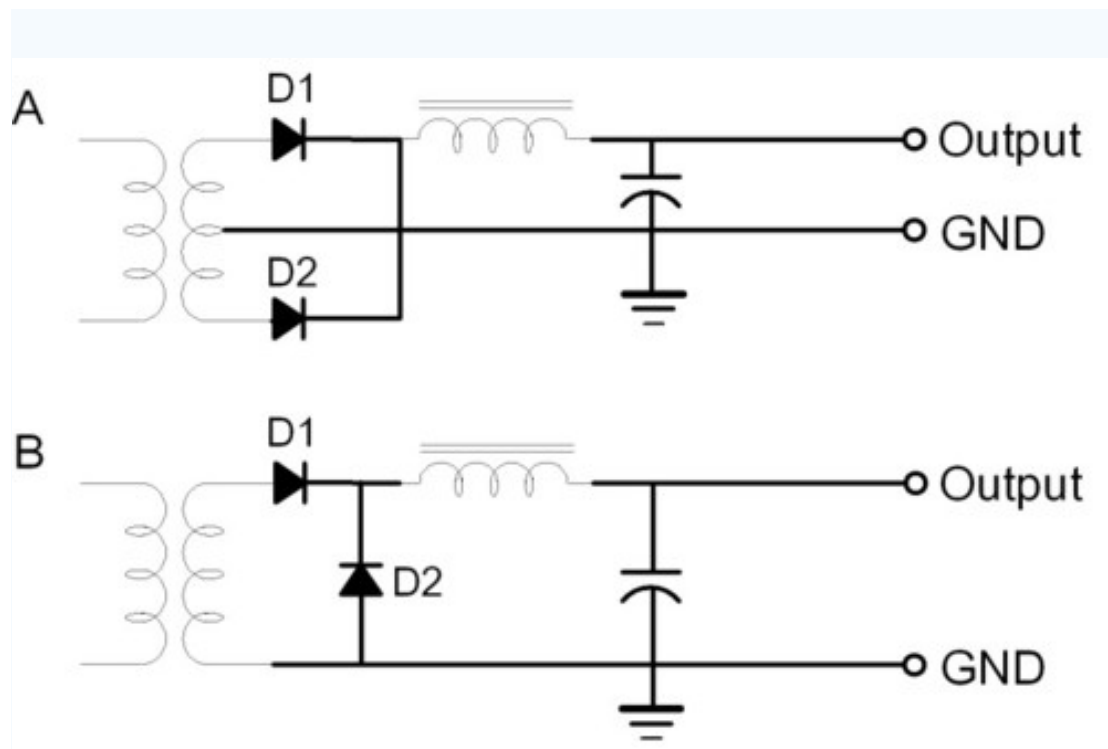
PWM 控制电路基于一块整合电路。一般情况下，没有装备主动式 PFC 的电源都会采用 TL494 整合电路（下图 26 中采用的是可兼容的 DBL494 整合芯片）。具备主动式 PFC 电路的电源里，有时候也会采用一种用来取代 PWM 芯片和 PFC 控制电路的芯片。CM6800 芯片就是一个很好的例子，它可以很好的集成 PWM 芯片和 PFC 控制电路的所有功能。



PWM 控制电路

●二次侧

最后要介绍的是二次侧。在二次侧部分，主变压器的输出将会被整流和过滤，然后输出 PC 所需要的电压。 -5 V 和 -12 V 的整流是只需要有普通的二极管就能完成，因为他们不需要高功率和大电流。不过 $+3.3\text{ V}$ ， $+5\text{ V}$ 以及 $+12\text{ V}$ 等正压的整流任务需要由大功率肖特基整流桥才行。这种肖特基有三个针脚，外形和功率二极管比较相似，但是它们的内部集成了两个大功率二极管。二次侧整流工作能否完成是由电源电路结构决定，一般有可能会有两种整流电路结构，如图 27 所示：



整流模式

模式 A 更多的会被用于低端入门级电源中，这种模式需要从变压器引出三个针脚。模式 B 则多用于高端电源中，这种模式一般只需要配备两个变压器，但是铁素体电感必须够大才行，所以这种模式成本较高，这也是为什么低端电源不采用这种模式的主要原因。

此外，对于高端电源而言，为了提升最大电流输出能力，这些电源往往会采用两颗二极管串联的方式将整流电路的最大电流输出提升一倍。

无论是高端还是低端电源，其+12 V 和+5 V 的输出都配备了完整的整流电路和滤波电路，所以所有的电源至少都需要 2 组图 27 所示的整流电路。

对于 3.3V 输出而言，有三种选项可供选择：

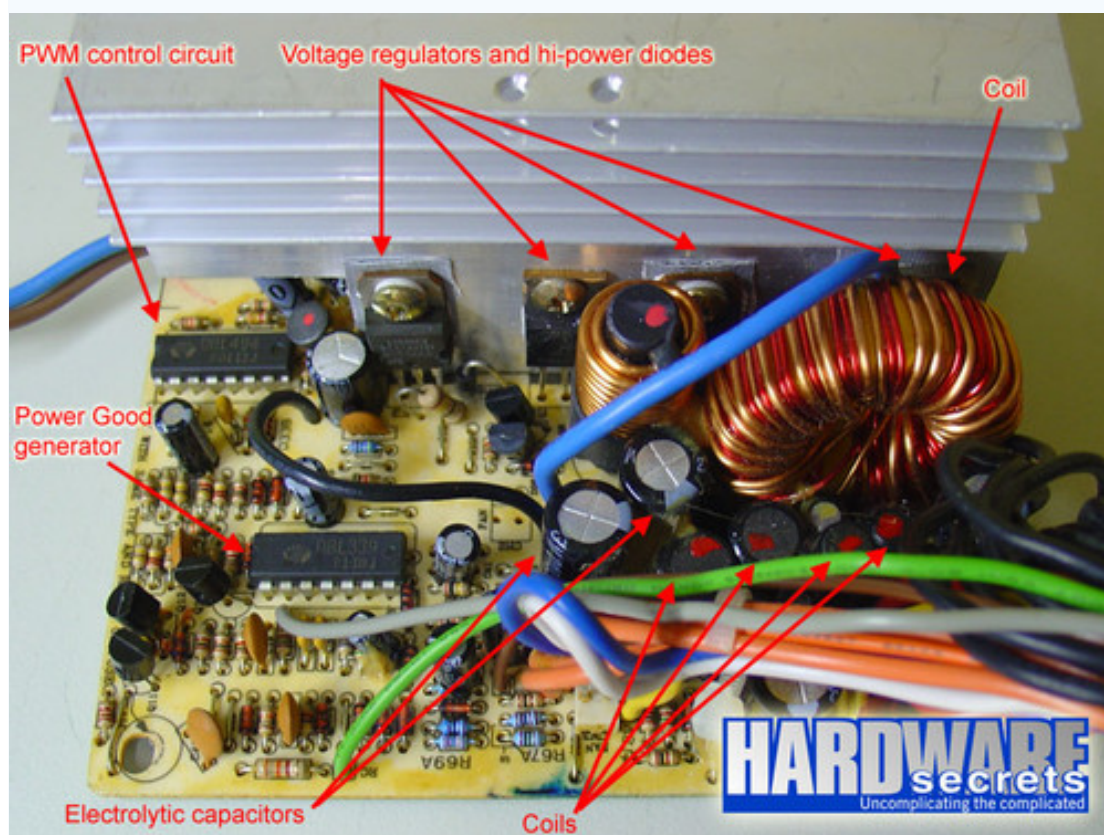
☆在+5 V 输出部分增加一个 3.3V 的电压稳压器，很多低端电源都是采用的这种设计方案；

☆为 3.3 V 输出增加一个像图 27 所示的完整的整流电路和滤波电路，但是需要和 5 V 整流电路共享一个变压器。这是高端电源比较普通的一种设计方案。

☆采用一个完整的独立的 3.3V 整流电路和滤波电路。这种方案非常罕见，仅在少数发烧级顶级电源中才可能出现，比如说安耐美的银河 1000W。

由于 3.3V 输出通常是完全公用 5V 整流电路（常见于低端电源）或者部分共用（常见于高端电源中），所以说 3.3V 输出往往会受到 5V 输出的限制。这就是为什么很多电源要在铭牌中著名“3.3V 和 5V 联合输出”。

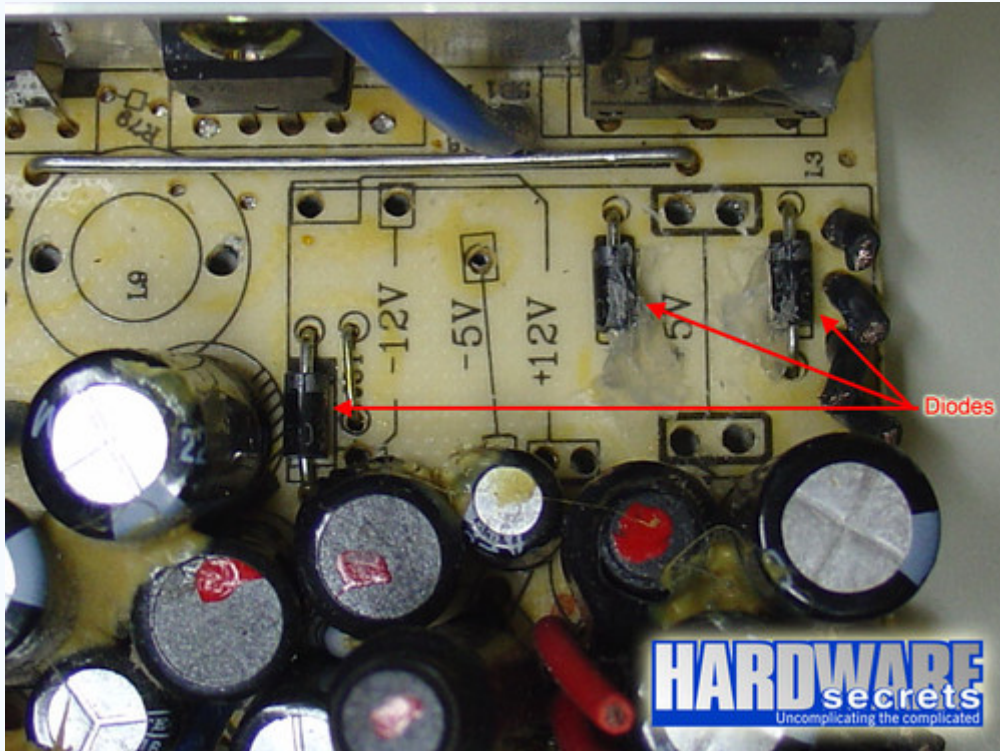
下图 28 是一台低端电源的二次侧。这里我们可以看到负责产生 PG 信号的整合电路。通常情况下，低端电源都会采用 LM339 整合电路。



二次侧

此外，我们还可以看到一些电解电容（这些电容的个头和倍压器或者主动式 PFC 电路的电容相比要小的多）和电感，这些元件主要是负责滤波功能。

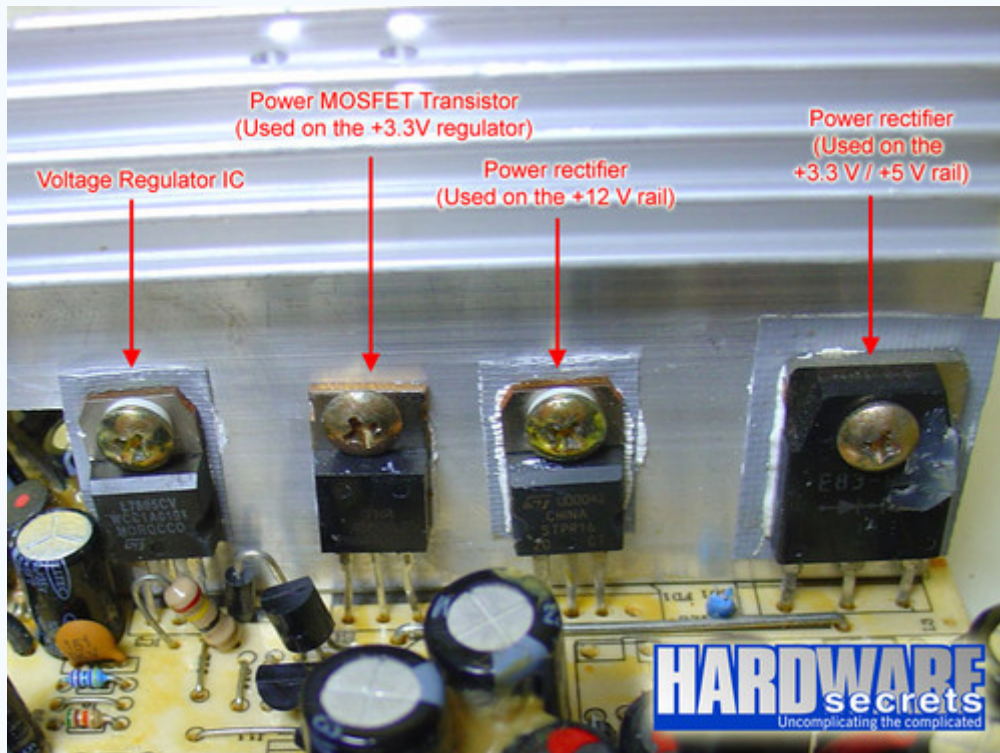
为了更清晰的观察这款电源，我们将电源上的飞线以及滤波线圈全部移除，如图 29 所示。在这里我们能看到一些小的二极管，主要用于 -12 V and -5 V 的整流，通过的电流非常小（这款电源只要 0.5 A ）。其他的电压输出的电流至少要 1 A ，这需要功率二极管负责整流。



- 12 V 以及 - 5V 负压电路的整流二极管

●二次侧（2）

下图 30 描述的是低端电源二次侧散热片上的元器件：



二次侧散热片上的元器件

从左至右以此为：

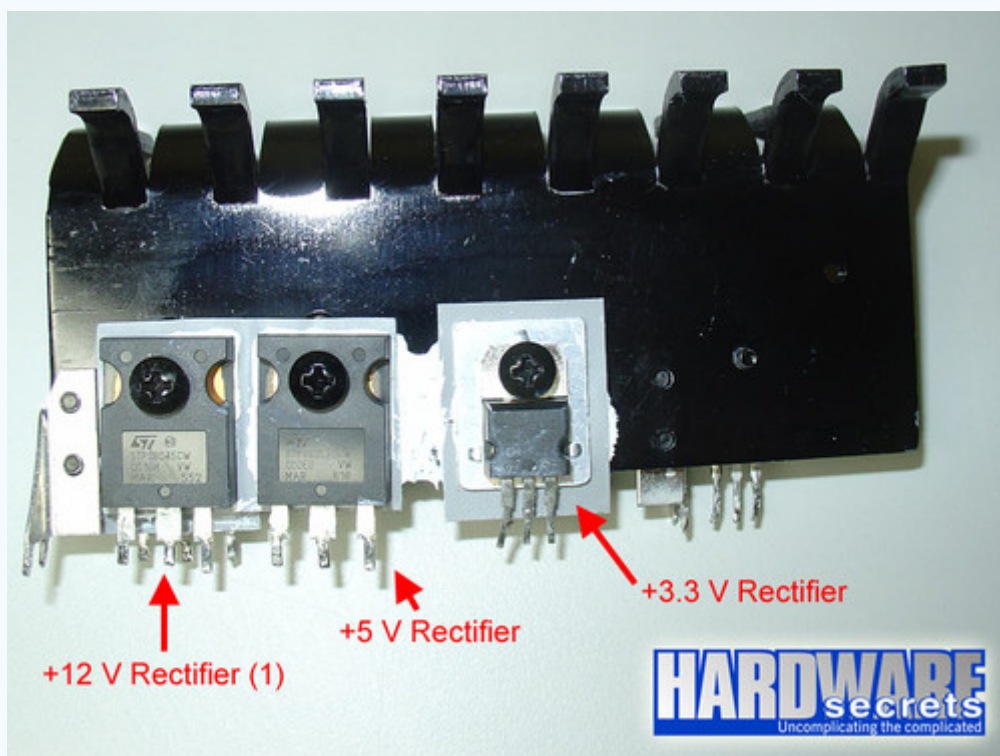
☆稳压器 IC 芯片——尽管它有三个针脚而且看起来和三极管非常相似，但是它却是可 IC 芯片。这款电源采用的是 7805 稳压器（5V 稳压器），负责+5VSB 的稳压。之前我们已经提到过，+5VSB 采用的是独立的输出电路，因为它即便是在 PC 处于断电状态时依然需要向 +5VSB 提供+5 V 输出。这就是为什么+5VSB 输出也通常会被称之为“待机输出”。7805 IC 最大可以提供 1A 的电流输出。

☆功率 MOSFET 晶体管，主要负责 3.3V 输出。这款电源的 MOSFET 型号为 PHP45N03LT，最大可允许 45A 的电流通过。上一页我们已经提到，只有低端电源才会采用和 5V 共享的 3.3V 稳压器。

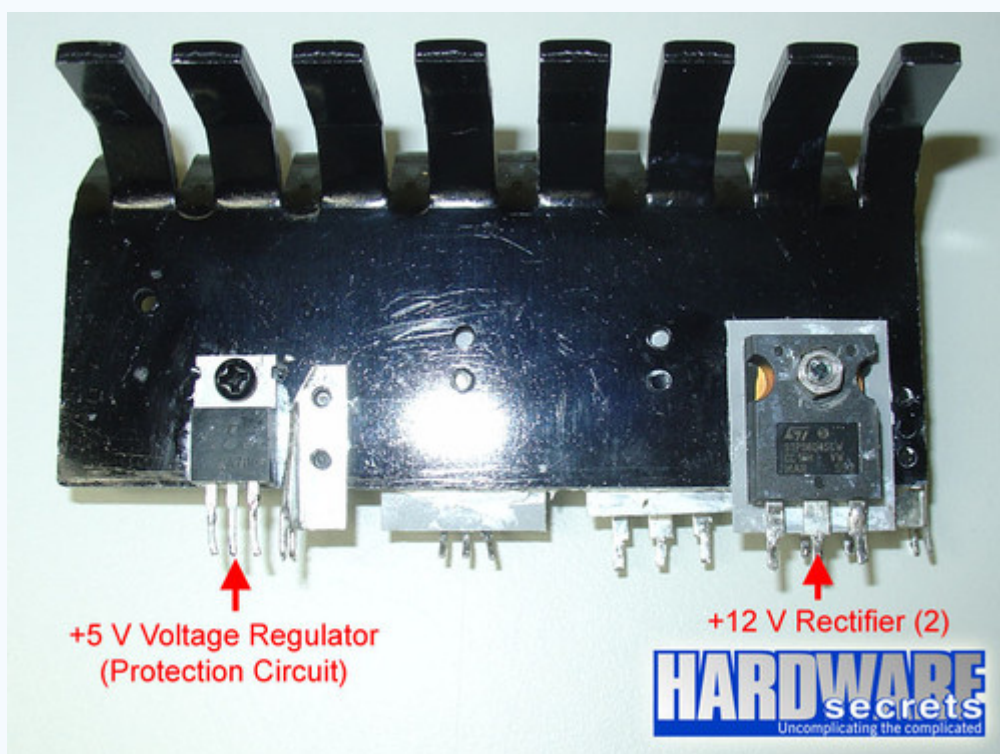
☆功率肖特基整流器，由两个二极管整合而成。这款电源的肖特基型号为 STPR1620CT，它的每颗二极管最大可允许 8A 的电流通过（总共为 16A）。这种功率肖特基整流器通常被用于 12V 输出。

☆另一颗功率肖特基整流器。这款电源采用的型号是 E83-004，最大可允许 60A 电流通过。这种功率整流器常被用于+5 V 和+ 3.3 V 输出。因为+5 V 和+ 3.3 V 输出采用的是同一个整流器，所以它们的总和不能超过整流器的电流限制。这就是我们常说的联合输出的概念。换句话说就是 3.3V 输出来自 5V 输出。和其他各路输出不同，变压器没有 3.3V 输出。这种设计常用于低端电源。高端电源一般都会采用独立的+3.3 V 和+5 V 输出。

下面来看看高端电源的二次侧主要元件：



高端电源二次侧的元件



高端电源二次侧的元件

这里我们可以看到：

两颗并联的负责 12V 输出的功率肖特基整流器。低端电源往往只有一颗这样的整流器。这种设计自然让整流器的最大电流输出翻了一倍。这款电源采用的是两颗 STPS6045CW 肖特基整流器，每颗最大可运行 60A 电流通过。

☆一颗负责 5V 输出的肖特基整流器。这款电源采用的是 STPS60L30CW 整流器，最大可允许 60A 电流通过。

☆一颗负责 3.3V 输出的肖特基整流器，这是高端电源和低端电源的主要区别（低端电源往往没有单独的 3.3V 输出）。这款电源采用的是 STPS30L30CT 肖特基，最大可允许 30A 电流通过。

☆一颗电源保护电路的稳压器。这也是高端电源的象征。

主要指出的是，以上我们所说的最大电流输出是仅仅是相对于单个元器件而言的。一款电源的最大电流输出实际上要取决于与之相连的很多元器件的品质，比如说线圈电感、变压器、线材的粗细以及 PCB 电路板的宽窄等等。我们可以通过整流器的最大电流和输出的电压相乘得出电源理论上的最大功率。比如说，图 30 中的电源的 12V 输出最大功率应该为 $16A \times 12V = 192W$ 。

注：以上文章是 hardwaresecrets 网站于 2006 年发布的一篇技术性文章，虽然距今已有时日，但对于电源初学者而言，这篇文章还是非常有参考价值的，希望对读者朋友起到一定的帮助作用。由于文中有很多专业词汇，翻译过程中可能会有所纰漏和不足，希望电源达人能够多多指正，不胜感激。原帖地址：

<http://www.hardwaresecrets.com/article/Anatomy-of-Switching-Power-Supplies/327/1>