

各位朋友，大家好：

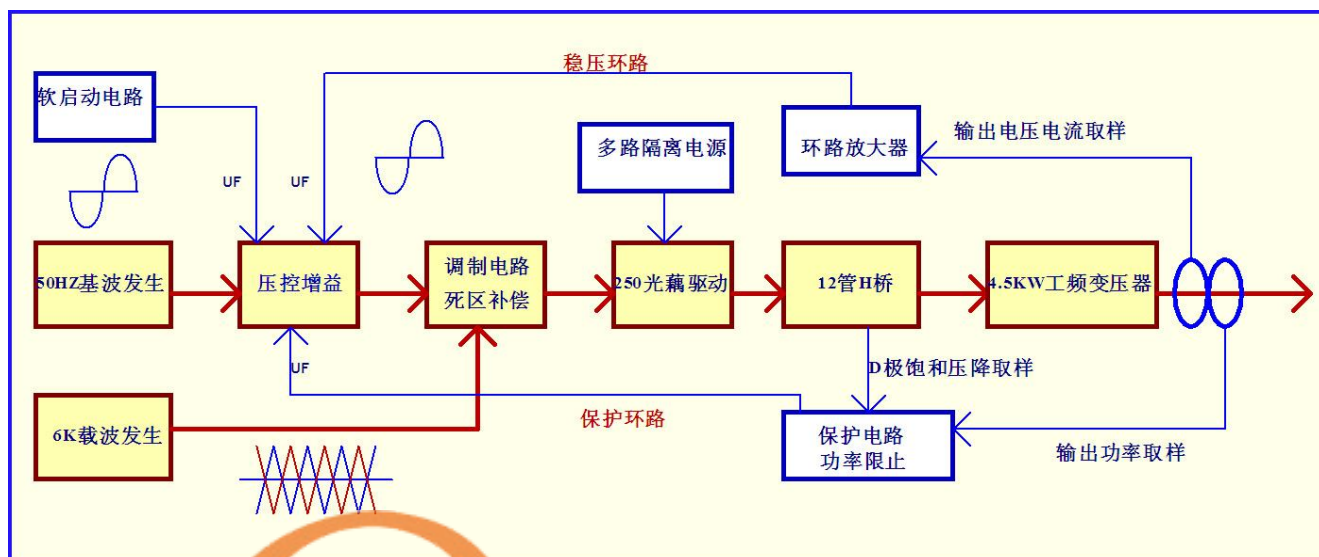
我来自杭州，我姓寿，加上我年纪有点大，所以论坛上大家称我老寿。先说明一下，我不是专业搞电源的工程师，我做电源，纯粹是出于自己对电源，特别是逆变电源的爱好。2009 年的 6 月份开始，我开始学习正弦波逆变器，当时没有一点资料，幸好我找到了电源网，并在电源网上认识了一大帮很有才气，又很专业的朋友。所以，可以这么说：电源网是我的大学，那些朋友是我的老师。深圳的钟工是我的第一位老师，为什么这么说呢，因为，钟工是在电源网上发表关于纯硬件逆变电路最多的一位网友，此后还有深圳的张工，河南的王工，我们杭州的杜工等，这次，我做 4.5KW 的工频逆变器，又得到了佛山丁工，青岛程工的热心指导。所以，我今天的这个发言，不能算是演讲，只能算是借此机会，对上述几位朋友表示衷心感谢，对电源网给我这样一个学习的机会，也表示至诚的谢意，并将我在这二年时间中的学习成果向大家做一个汇报。

今天我要讲的话题有点老！为什么这么说呢，因为我今天讲的是一台 4.5KW 工频纯硬件逆变电源。今天，数字化芯片高速发展，高频逆变技术日益成熟，在这种形势下，我再来讲纯硬件，再来讲工频逆变技术，所以显得有点苍老了，有些古典了！但是：就象数码相机已经很成熟，但仍然有人喜欢用胶片，电视已很普及，但仍然有人喜欢看电影一样，还有很多像我这样的爱好者喜欢纯硬件，喜欢工频技术，俗话说：“青菜萝卜，各有所好”，加上我的本意在于“抛砖引玉”，所以，我就显丑了。

我于今年春节后，就想做一台功率大一点的工频逆变电源，但当时，因为变压器没有落实，所以，在很长时间内没有进展。最近，佛山的丁工

向我介绍了深圳的一家专业做逆变器工频变压器的厂家，事情才有了转机，现在，样机已经做出来了，正在做各方面的测试。

下面是我的电源方框图：



红线框内是主干电路：它主要有如下几块：50HZ 基准波发生电路；压控放大器；调制电路和死区补偿电路；光耦驱动电路；H 桥；工频变压器，6-7.5K 载波发生电路等。附属电路有：软启动；多路隔离电源，环路放大器；保护电路等。

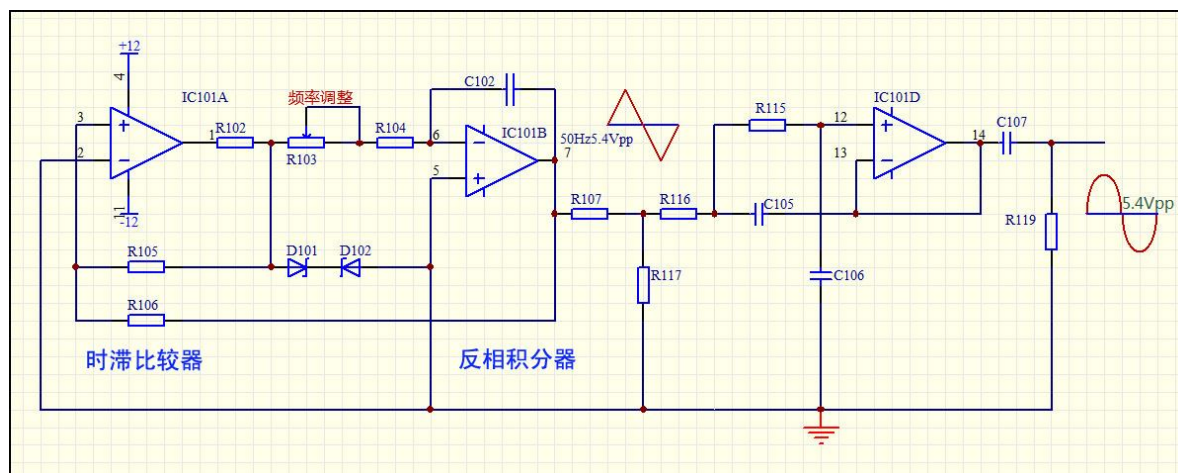
下面我分别对这几块电路做一些介绍：

### 一、50HZ 基波振荡电路：

有很多电路可以产生 50HZ 的正弦波，我们要求电路尽可能简单，调整容易，频率和幅度要相对稳定，我用的一款是：由上行时滞比较器和反相积分电路组成的三角波电路产生 50HZ 三角波信号。该电路只用二个单元的运放，电路很简单，频率的调试简单，只要调整一个电阻或一个电容，就可随意改变频率，且输出的三角波幅度和频率很稳定，完全能满足我们的要求。输出三角波后，再用一级有源滤波电路将高次谐波滤去，还原出

纯正的正弦波。

下面就是示意图：

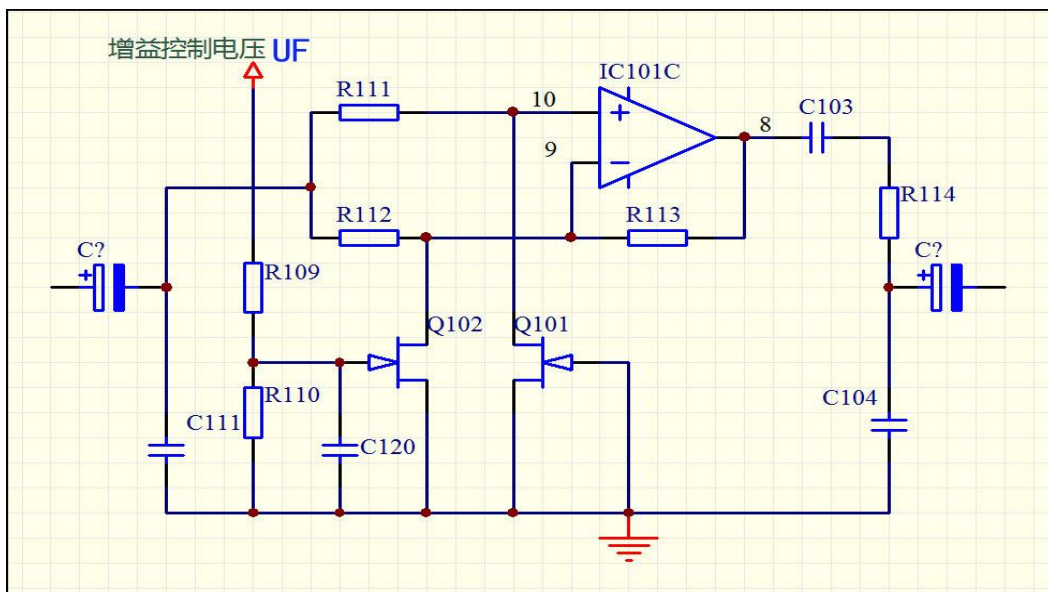


IC101A 和 IC101B 组成三角波振荡电路，D101 和 D102 是限幅电路，可以确保三角波输出幅度的稳定。IC101D 是一款中心频率为 50HZ 左右的有源滤波电路，该滤波电路的电压增益约在 3 倍左右。经它滤波后还原出来的正弦波，质量很高，THD 在 0.4% 以下，整个电路抗干扰和热稳定性都很好。

## 二、压控增益放大器：

所谓压控增益放大器，实际上就是用直流电压来控制增益的放大电路，有很多款专用 IC 就归属于这种电路。因为有了这样的放大器，就可以用直流电压来控制电路增益，大大方便了逆变器输出电压环路和电流环路的设计，可以解决环路相移等很多头痛的问题。对这样的电路，我们要求是：电路要简单；控制动态范围要大，也就是要能从 0 起调；附加失真要小，我曾经试用过 MC3340，但它价格很高，附加失真太高，有 1%，同时无法实现从 0 起调，

下面是我最终使用的电路：



图中 IC101C 运放组成一个普通的电压放大电路，它的反相端有一个结型场效应管 Q102 到地，这个 Q102 实际上就是一个用电压控制阻值的“压控电阻”，随着栅级电压的变压，它的 DS 之间的阻值就会发生变化，这时 R113 和 Q102 的电阻比值也会变化，放大器的电压增益就随之变化。这个电路比较简单，网上介绍得也很多。但它有一个缺点，就是结型场效应管的阻值变化并不是线性的，特别导通的起始阶段，这个问题很突出，导致输出波形的严重失真，使它失去了实用价值。为此，我们在运放的同相端，也接入一个相同的结型管，这样可以十分有效地抵消单个结型管引起的非线性失真。下面的表格是这个压控放大器测试结果：

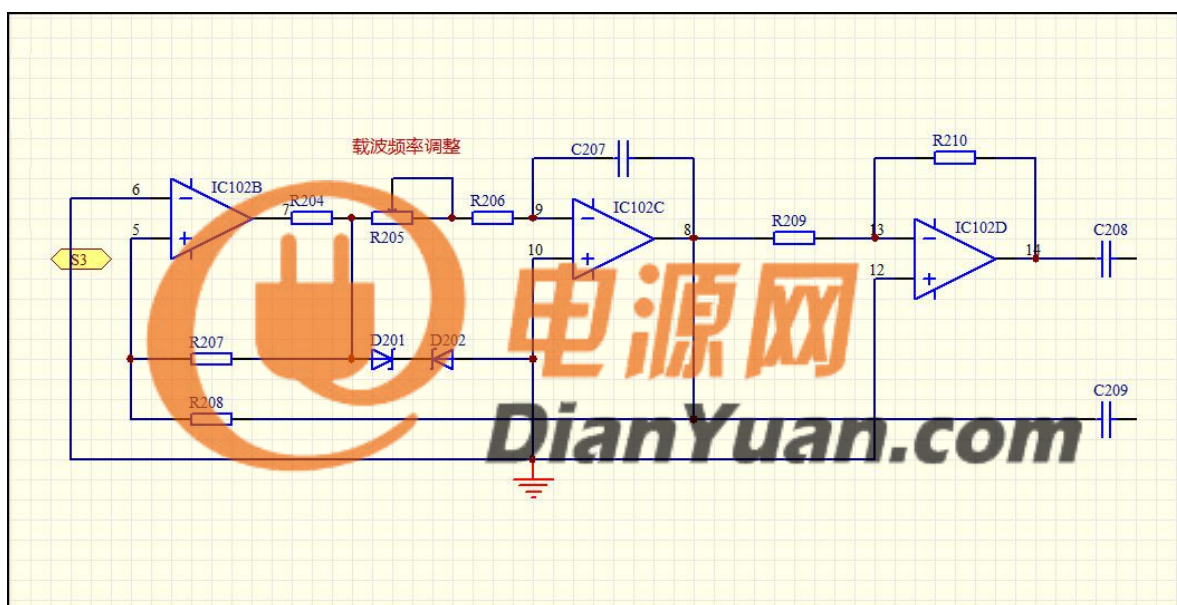




从上表可以看出，控制电压从 5V 到 6V 变化时，电路的增益从最大到最小变化，且这个变化基本上是线性的，因为没有使用轨至轨的运放，所以在运放电源为正负 6V 时，它最大输出为 10Vpp 以内，超过 10V 就要削顶了。在工作范围内，电路的附加失真很小，在 0.2% 以下。

上述图中的直流控制端：UF，就是直流反馈电压的输入端，也是保护电路、软启动电路、功率限制电路的控制端。

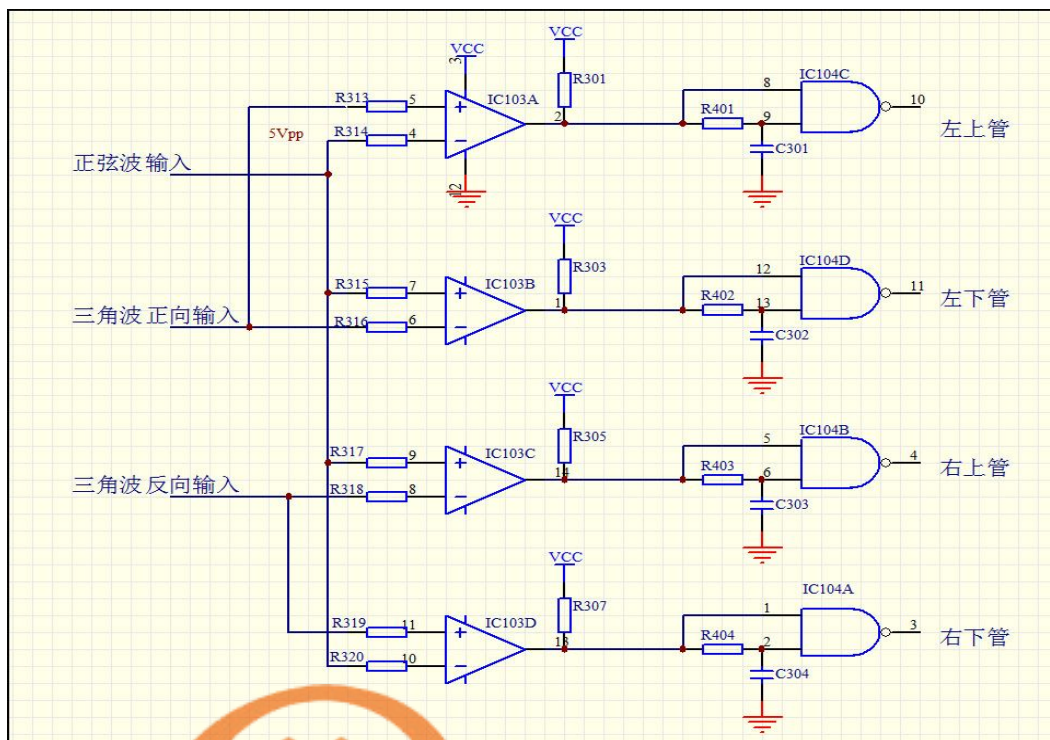
### 三、载波振荡电路：



载波振荡电路和 50HZ 基波振荡完全相同，输出频率为 6-7.5K，IC102D 是一级反相电路，输出二路幅度相同，频率相同，但相位相差 180 度的三角波。如果要逆变电源输出的正弦波 THD 尽可能的低，这个三角波的线性一定要好。

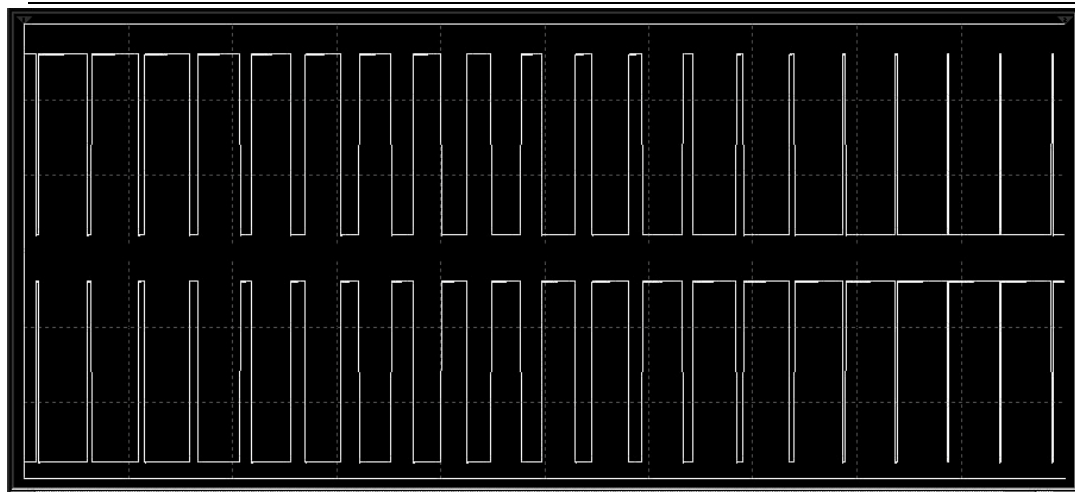
### 四、调制电路和死区补偿电路：

有了高质量的 50HZ 基波和高线性度的三角形，接下去就要把这二个信号送到调制电路，让调制电路生成 SPWM 波。



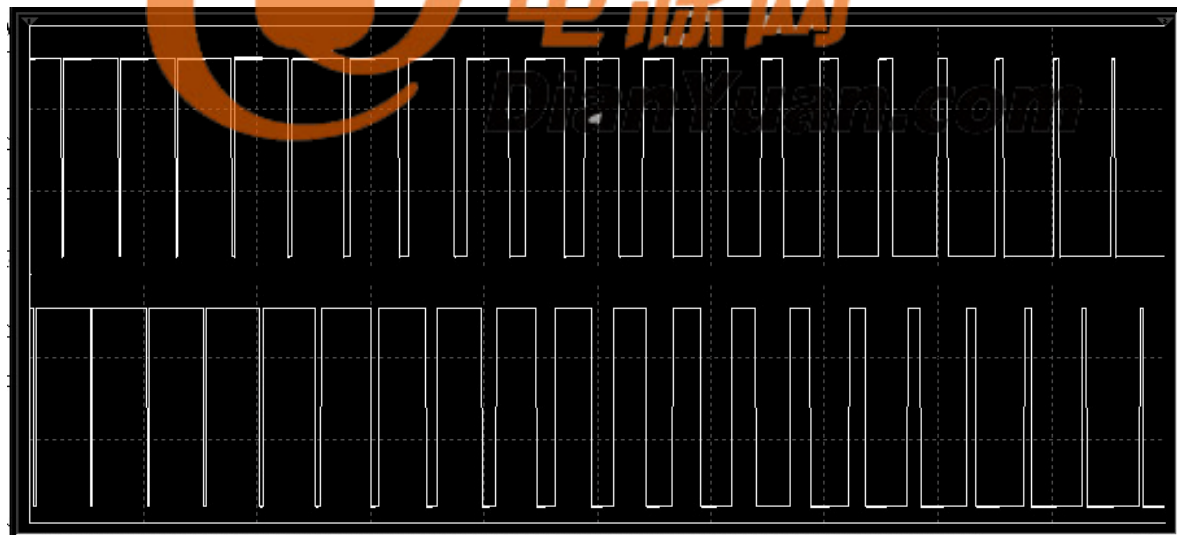
调制电路实际上是一个电压比较器电路，IC103 是一个四通道的比较器 LM339，其中 IC103A 和 IC103B 生成 H 桥左边上下二个开关管的驱动信号；IC103C 和 IC103D 生成 H 桥的右边上下二个开关管的驱动信号。IC104 是一个 CD4081 的门电路，它的输入端的其中一个脚组成一个延时电路，引成上下管的死区时间，其延时的时间关系为  $T=RC$ ，当  $R=47K$ ， $C=22P$  时或  $R=22K$ ， $C=47P$  时，它的死区时间约为 1US。

下面我们看一下从比较器出来的 SPWM 波形的时序关系图：

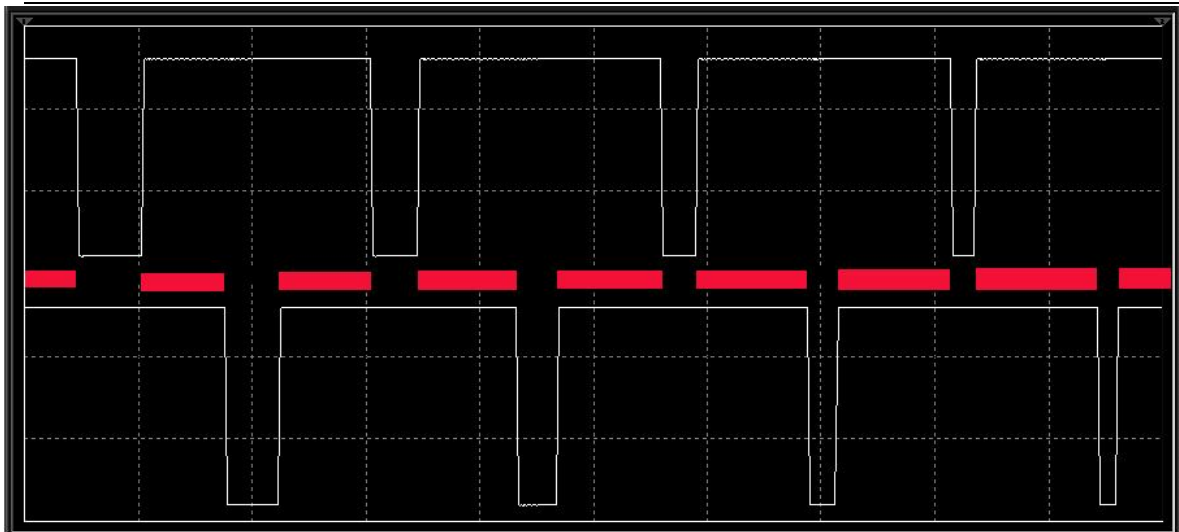


这是 H 桥左边或右边上下二个开关管驱动信号的时序关系，可以看出，这是二个相向刚好相反的驱动信号，这二个信号，经死区补偿后，送到 H 桥的左边上下管或右边上下管。

如果，我们把 H 桥对角线上的二个开关管的驱动信号取出来，看一下，就会发现它们的时序关系非常微妙：



从波形图上可以看出，这二个波形是互相错位的，似乎很难看出它们之间的关系，我把波形的时间轴放大后再看，见下图：

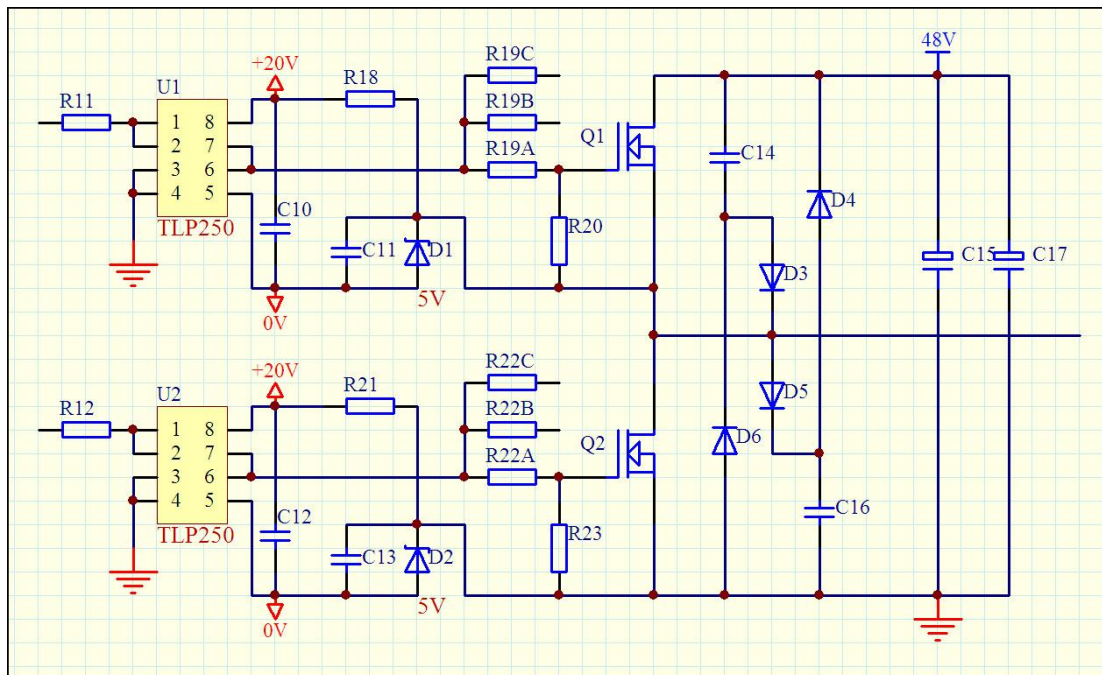


把时轴放大后就可以看出：实际上 H 桥对角线上的二个 MOS，在时序上是“与”的关系，也就是只有当二个开关管的驱动都是高电平时，H 桥对角线上的二个管子之间才有电流流过，见上图红线部分就是对角线导通的时间。图上又可以看出来，每个载波的周期中，对角线二个开关管导通两次，也就是，导通的次数为载波频率的二倍，这就是倍频调制的原理所在。所以，如果我的载波频率为 7.5K，则 H 桥中实际导通的次数为 15K。

## 五、光藕 TLP250 驱动电路

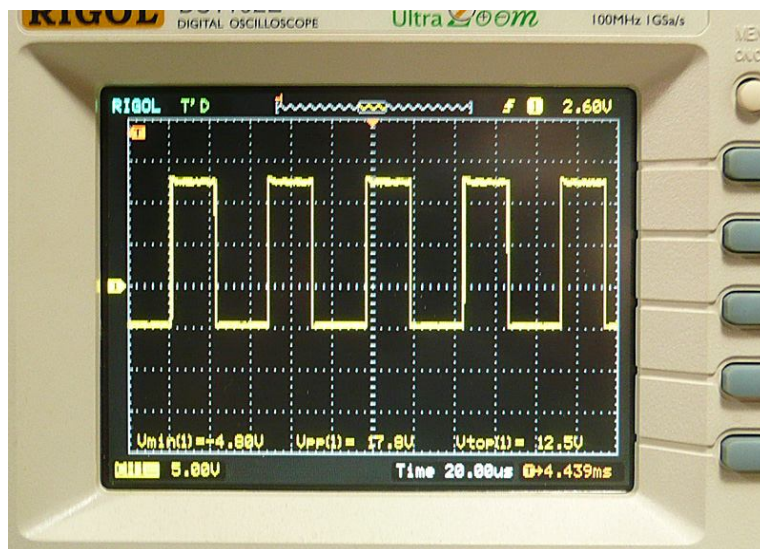
我喜欢在驱动电路中用光藕，如 TLP250 A3120 等，因为它相当稳定，PCB 布线容易，在供电方面，既可以用自举供电，也可以用独立的隔离电源供电；当然，我也做过用 IR2110 的驱动，效果也不错，成本比用光藕稍低一点。下面是我的 4.5KW 工频机的驱动电路：





图中是一个半桥，另一个半桥完全相同，250 光藕用 20V 直流供电，图中 D1 D2 是 5V 左右的稳压管，用它来产生 5V 左右的负压，用于开关管关断时的下拉动作，试验证明，用了负压，开关管的发热要低一点。因为 H 桥的每一臂用了三个开关管（骏锐的 RU190N08），所以图中每一路有三个驱动电阻，如 R19C、R19B、R19A，驱动电阻为 20R。

下图为驱动波形：



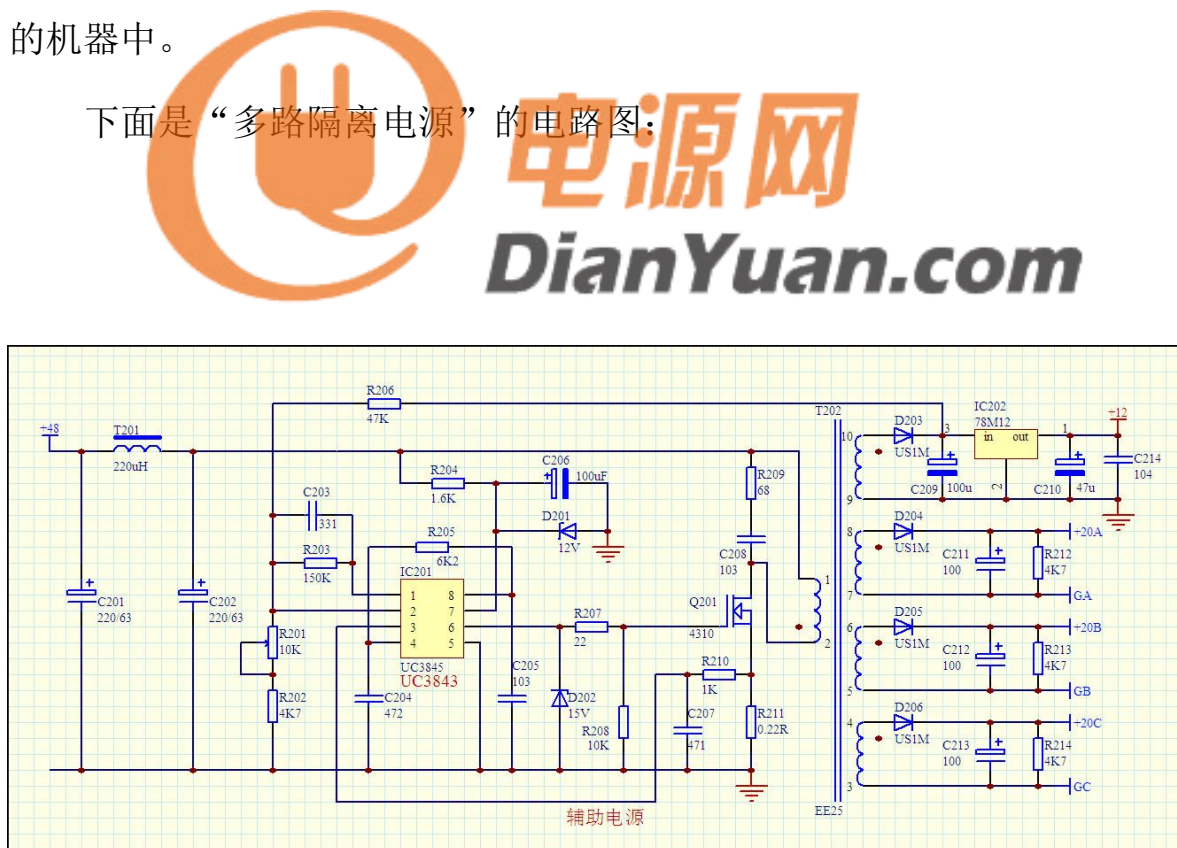
这个电路我没有加图腾，经试验，没有出现欠激现象，在做新的 PCB 时，打算把图腾放上去。图中 C14、C16、D3-D6 组成吸收回路，用来吸收尖峰电压。但我觉得，要吸收尖峰电压，最有效的方法是在每一对开关管的天和地之间（即电源和地）接容量为 105 的 CBB 电容。

到此为止，整个逆变电源的主要电路全在这里了，下面我再讲一下几个辅助电路：

## 六、辅助电源（多路隔离电源）

为了很使驱动光藕能更稳定更可靠地工作，用多路隔离电源是一个比较好的方案，但这种方案因为要增加成本，所以，一般都用在功率比较大的机器中。

下面是“多路隔离电源”的电路图：

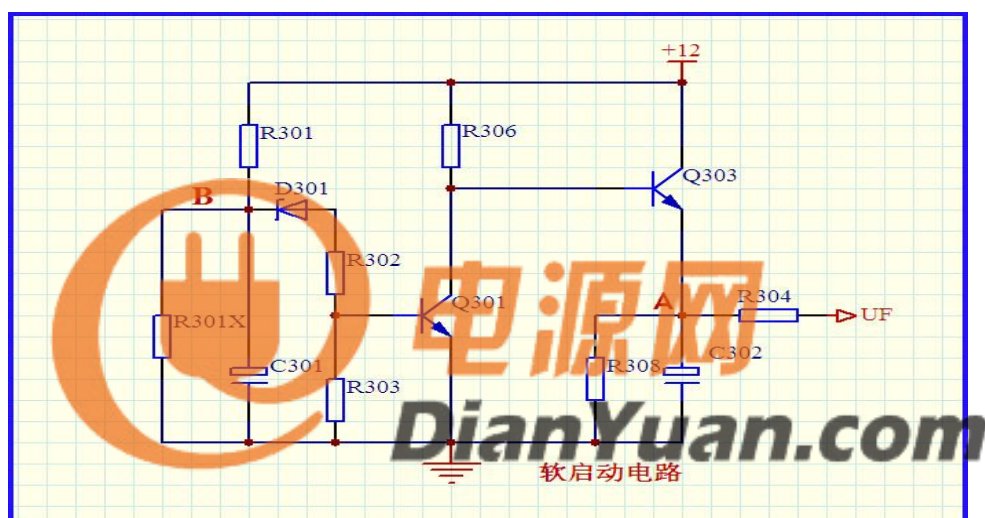


这是一个典型的小功率反激式开关电源，只要调整电阻 R204 阻值和高频变压器初级的圈数，就可以用在不同 BT 电压的机器中，我曾经用在 12V 24V

48V 的机器上，工作很稳定。因为功率很小，所以变压器绕制很方便，不需要用什么“夹层”绕法，只要先绕初级，再逐个绕次级，不会产生尖峰电压之类的东西，但变压器次级的各个绕组之间的耐压要做好。

## 七、软启动电路

因为大功率工频变压器的绕组电感量很大，如果突然启动，会在线圈上产生很强的感应电动势，这对开关管的安全不利，所以，最好能加一个软启动电路，让 SPWM 的调制度慢慢增加。



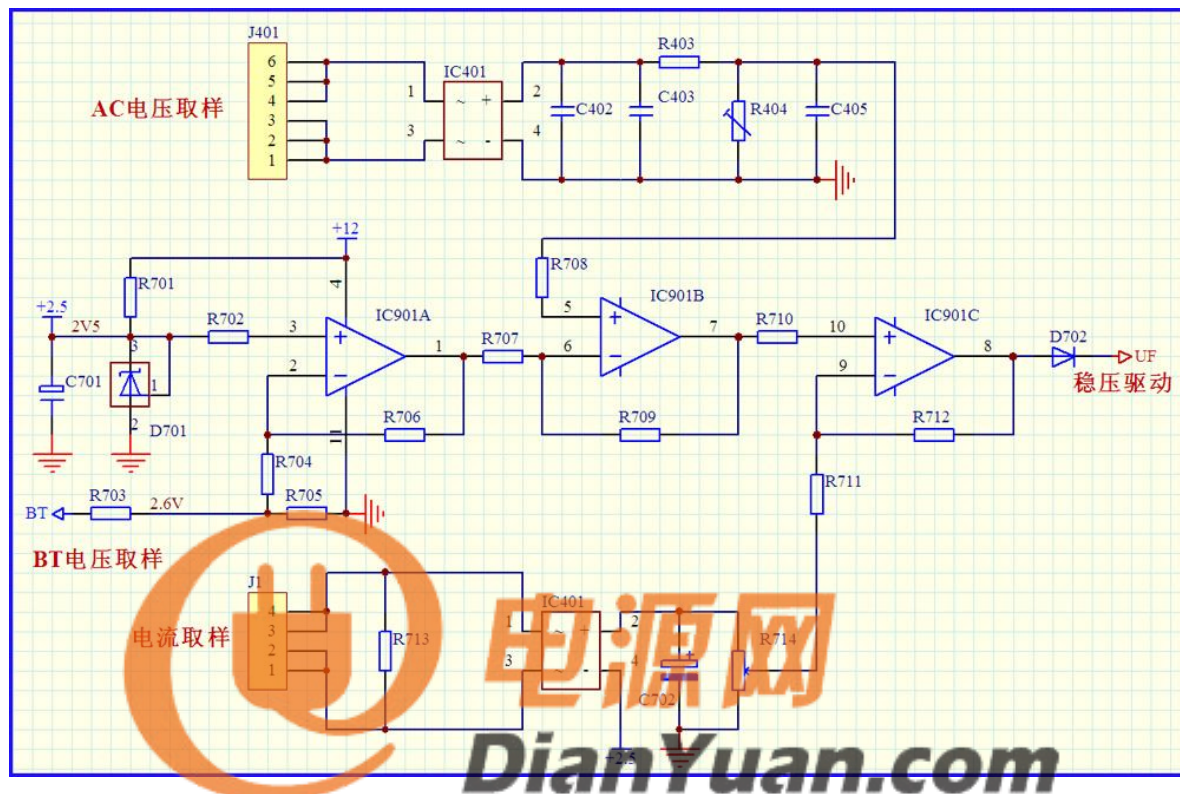
前面我讲到，在压控放大电路中，如果 UF 端的电压大于等于 6V，该放大器输出的正弦波信号将被关闭，如果小于等于 5V，输出信号最大。所以，在开机时，我们如果能让 UF 端的电压从 6V 以上慢慢下降到 5V 以下，这样，压控放大电路就会慢慢地将正弦波信号升高到预定值，达到了软启动的目的。

该图工作原理：开机时，C301 通过电阻 R301 充电，此时，Q301 是截止的；但 Q303 却是一上电就导通，快速对 C302 充满电；过 2 秒钟后，C301 上的电压已充高，B 点电压大于稳压管 D301 的阈值，使 D301 导通，让



Q302 截止，此时，C302 就开始向 R308 放电，A 点的电压就慢慢从 12V 开始下降，并经过 6V、5V 这二个点。

## 八、环路放大电路



我这台工频逆变电源，其输出电压很稳定，BT 电压在 44V-58V 变化时，负载从 0-4000 多 W 变化时，其输出电压能始终稳定在 220V 左右，变化小于 2V。这样的稳压精度，主要是靠环路放大电路来实现的。

从图中，我们可以看出有三个取样点：分别是输出 AC 电流、输出 AC 电压、BT 直流电压。

其中 AC 输出电流取样是第一环，也叫作内环，用交流互感器来检测输出电流的大小，负载越重，电流就越大，这里，环路放大电路就把 UF 点电压往下拉，以补偿因为负载增加引起的输出电压下跌。

AC 输出电压取样是第二环，也叫外环，用 200K 左右的隔离电阻或



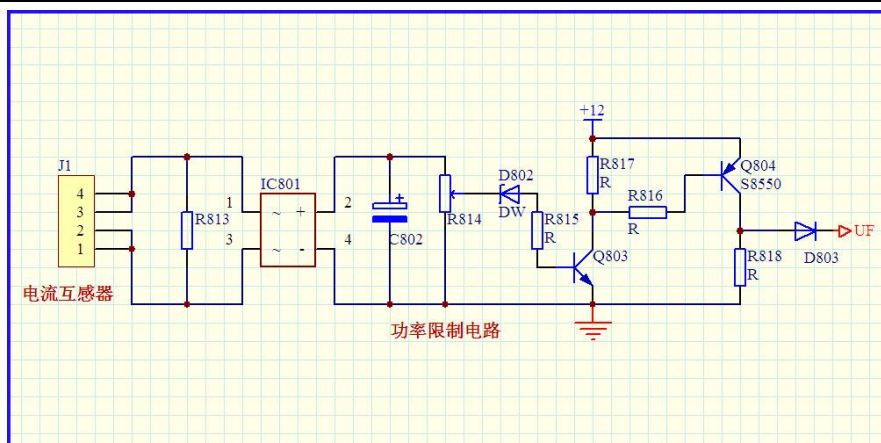
220: 12 的小功率变压器做 AC 电压取样，经整流、滤波和分压后送到 IC901B 的 5 脚，当输出电压因为某种原因升到时，该放大器就把 UF 点的电压往上拉，最终使输出电压回复到原值。相反，输出电压下跌时，就把 UF 点电压往下拉。

BT 电压取样是在最外环，当 BT 电压在 44-58V 之间变化时，该放大电路能及时对 UF 点的电压进行相应地精细地调整，使整机的输出电压能始终咬在 220V 附近。

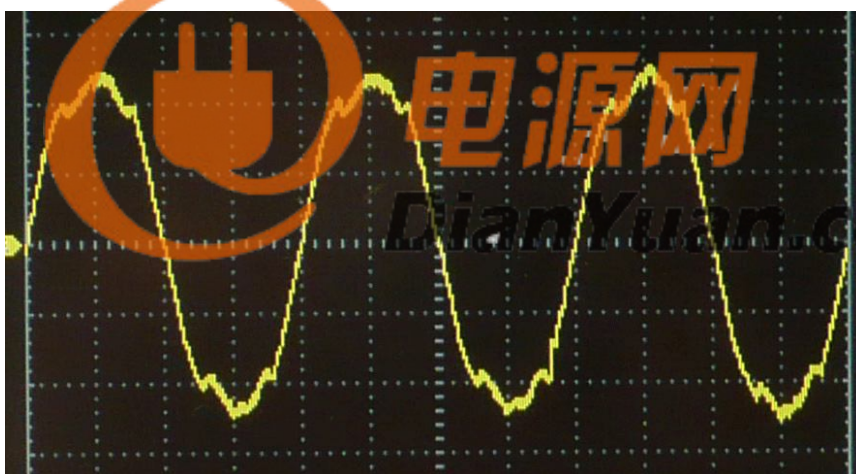
环路放大器的调整也比较简单，先调 R404 使整机空载输出电压在 220V，然后加载到额定负载，这时输出电压肯定下跌，再调 R714，使输出电压回到 220V。整机要调整的地方就三个，另一个是在基波振荡电路中的电位器，调整它使基波频率为 50HZ。

### 九、输出功率限制电路

一般我们在设计逆变电源时，总会有一个过载保护电路，我的 2400W 高频电源，用的是硬关断方式，就是在超过规定功率时，机器自动关闭，而在这款工频机中，我用的是软性的过载保护，就是当负载超过额定值时，驱动电路并没有直接关闭 SPWM，而是控制 SPWM 的调制度，强制性地让机器的输出功率降下来。



我们仍然在 UF 这点上做文章，在电流互感器输出的电压超标，Q803 导通，又使 Q804 导通，UF 点电压就被往上拉，正弦波信号就被短时间关闭，这时过载又消失，Q804 又截止，正弦波信号又恢复，所以，这是一种打嗝式限制方式，会在输出正弦波的顶部出现压缩，见下图：



当出现功率超标时，LED 指示灯和蜂鸣器会同时工作，以提醒使用者。

## 十、短路保护电路

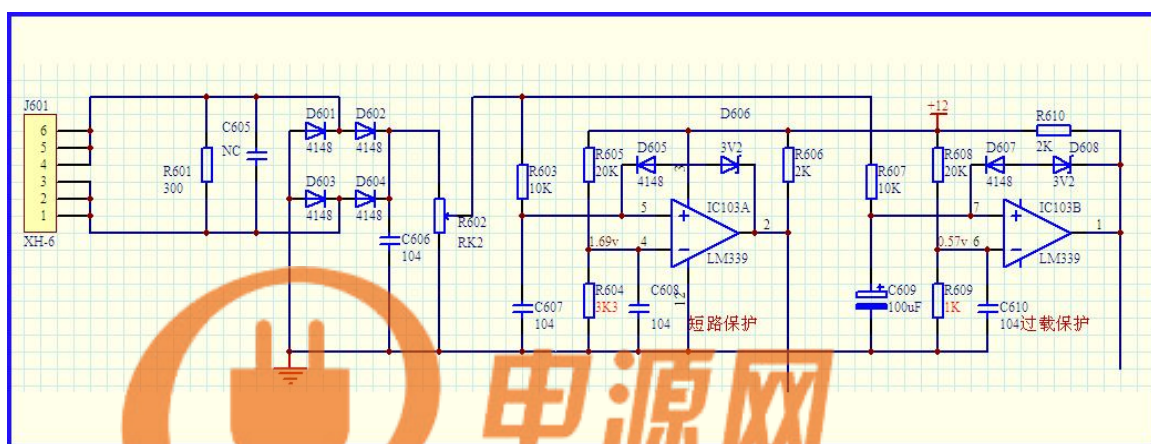
我在 300-2400W 的所有高频机中，用的短路保护电路，基本都是用积分式充电方式+电压比较器动作，来关断 SPWM，这种方式也很可靠，

电路也很多，也很成熟了。

在 1600W-2000W 工频机上，我用过二种保护电路：

一种是在输出端加交流电流互感器的方式来的，让互感器的输出电压触发比较器反转，关闭 SPWM；

另一种方式是：在变压器的初级串入高频互感器，这是我在大功率开关电源上用过的方法，同样也可以实现短路保护。

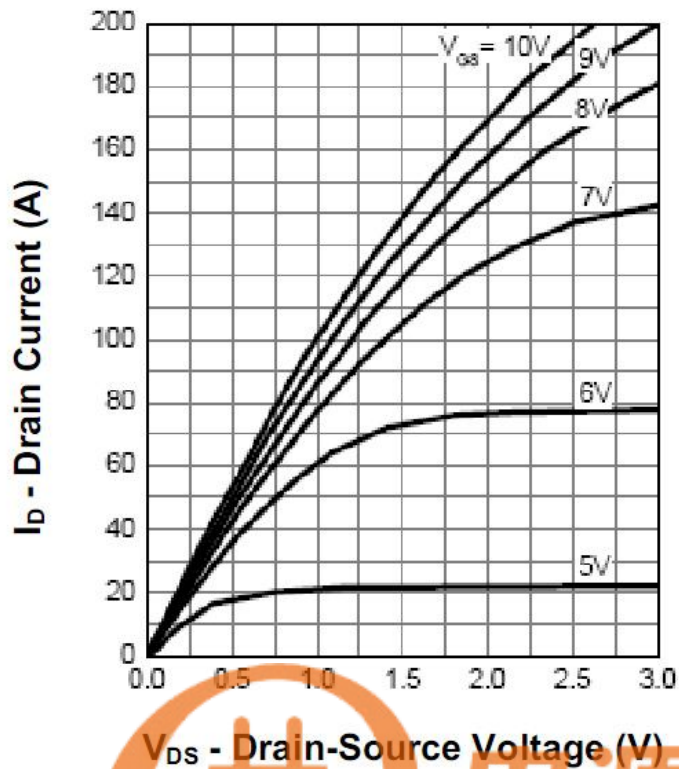


这次设计 4.5KW 工频机时，因为考虑到它的功率比较大，为了更安全可靠起见，所以用的是检测开关管 D 极饱和电压的方式。

RU190N08 的输出电流和 DS 压降的关系如下图：

它在输出电流在 100-140A 时，其 DS 之间的压降约为 1-1.5V，所在，我在电路就把 1-1.5V 做为保护电路动作的阈值，当 DS 压降超过 1.5V 时，检测二极管截止，触发比较器动作，关闭 SPWM。我只在 H 桥的二个下管上设置检测电路。因为在这次会议前，我的保护电路还来不及调试完成，所以，这次不能和大家见面，不能不说是一种遗憾，等我做完了短路测试后，大家再在论坛上讨论吧。

### Output Characteristics

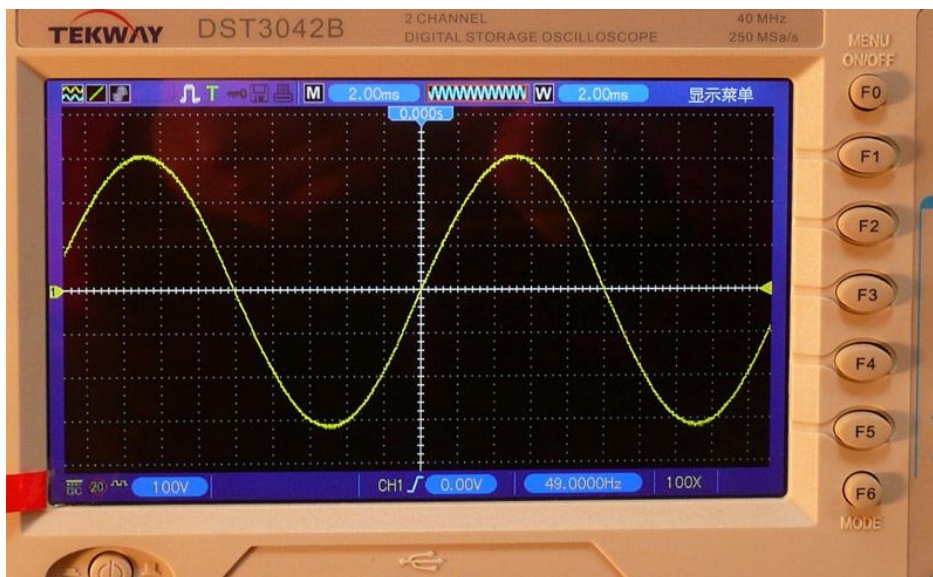


各位朋友，我的汇报就到这里，因为水平有限，所讲内容可能有错，务请各位朋友及时指正，谢谢各位，我在这里邀请各位有空到杭州玩，杭州是个好地方！

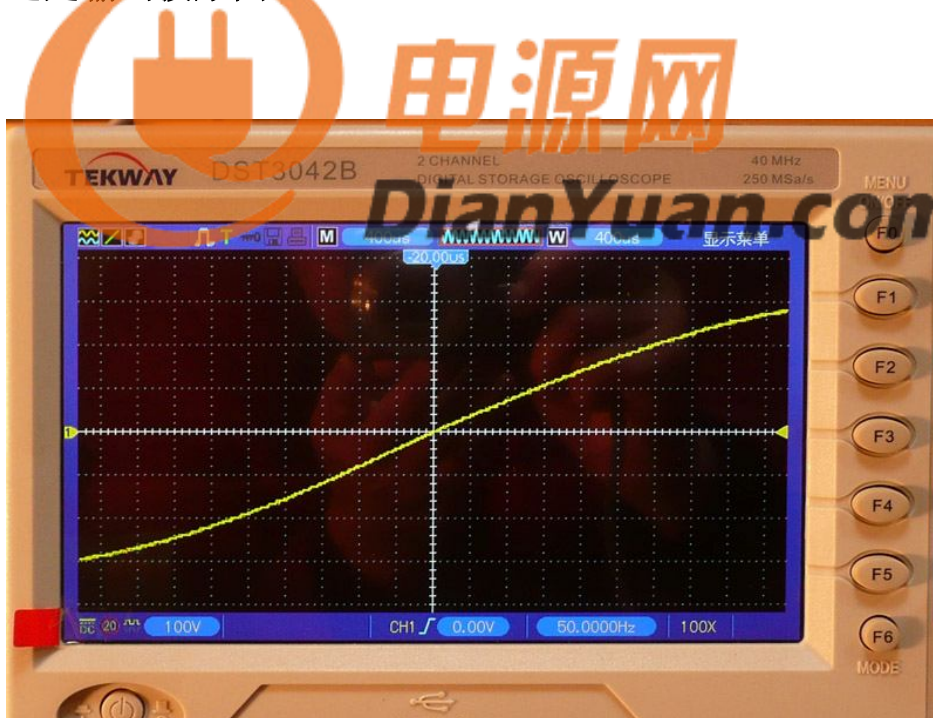
再见！



最后，是我的几幅工程照片：



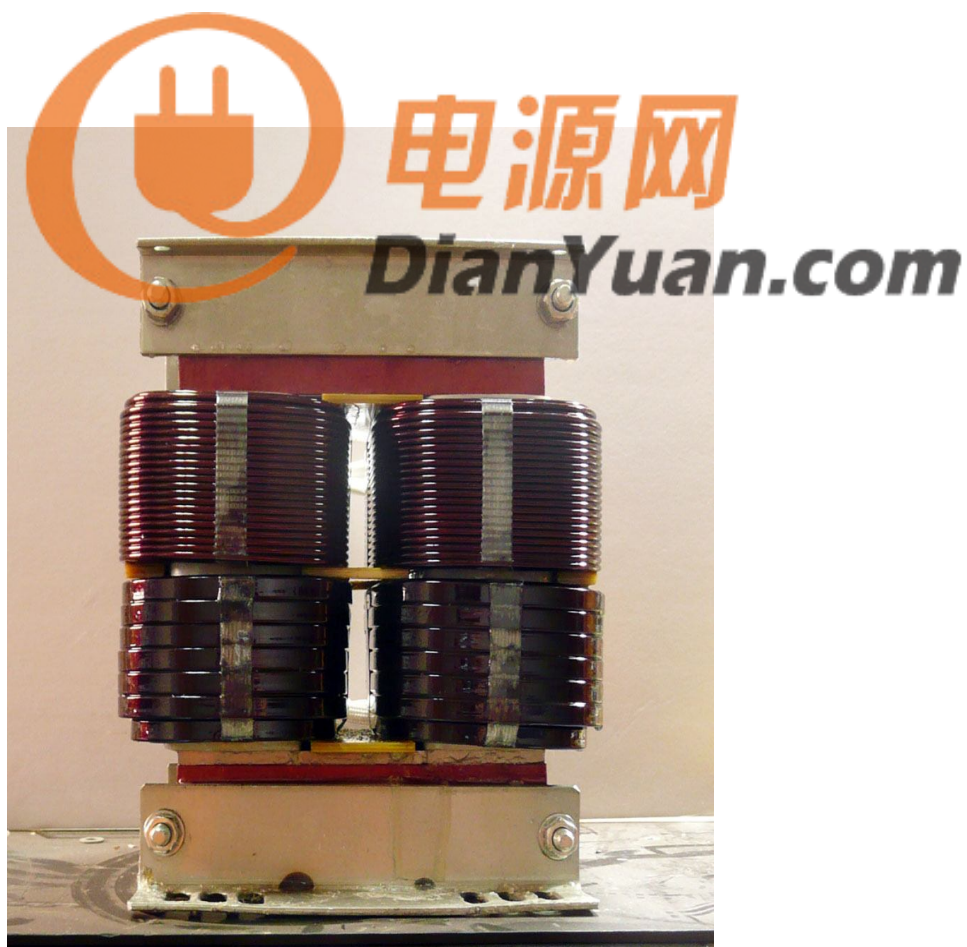
这是输出波形图



这是过零点的波形



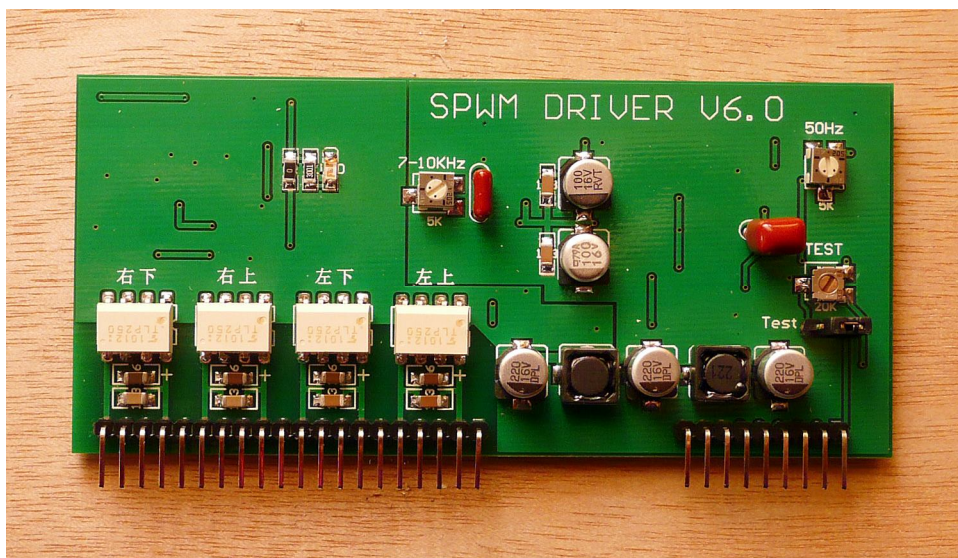
这是输出 THD 测试



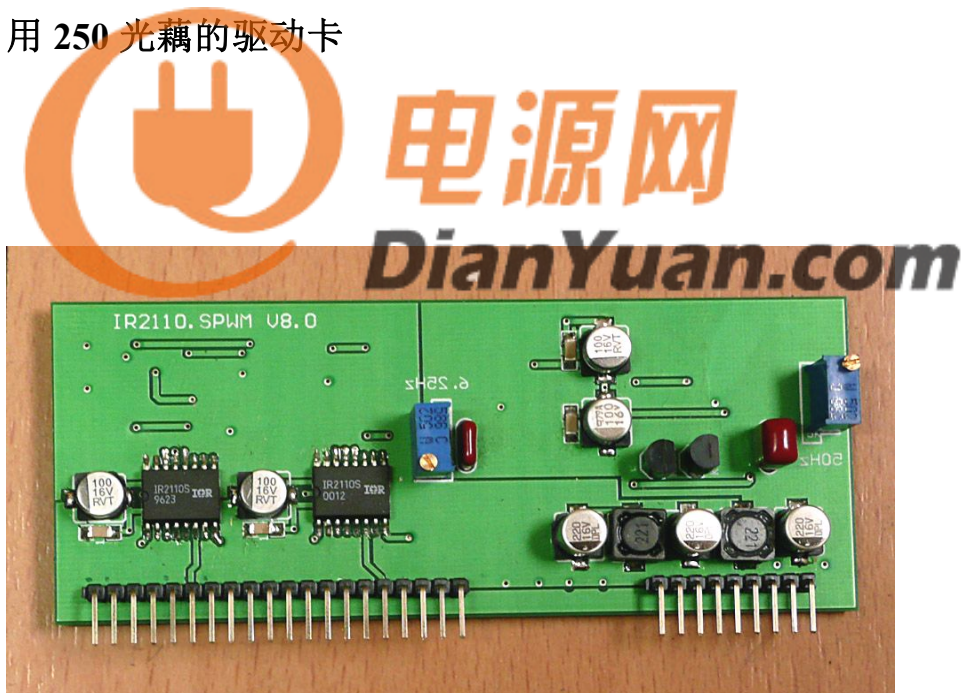
4.5KW 工频变压器



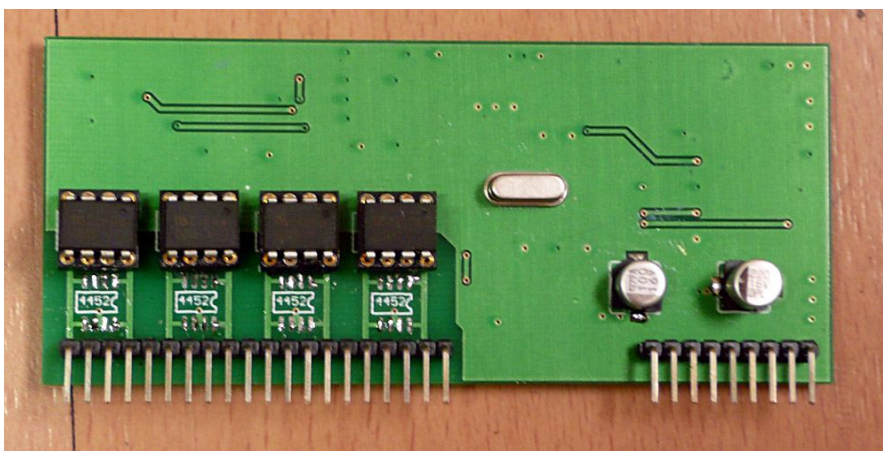
## 我做的各种驱动板



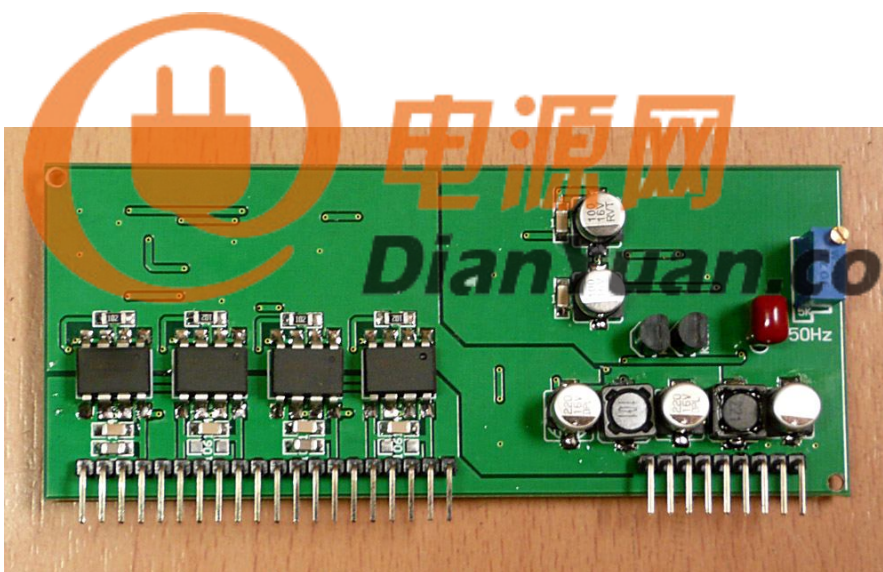
用 250 光藕的驱动卡



用 IR2110 的驱动卡

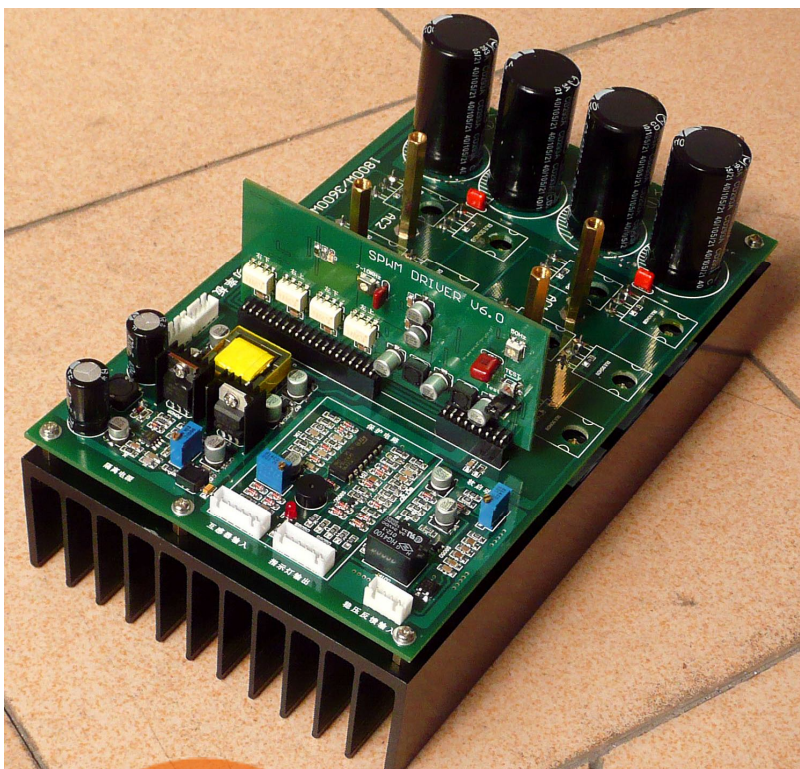


用 PIC 单片机的驱动卡



用 A3120 光藕的驱动卡





功率板



输出3009W 效率约88.9%

保险丝压降有0.8-0.9V, 实际到板为47.8V

开机照片