小功率干式工频环型变压器 DIY

免　责　声　明

本文是一个手工制作小功率环型变压器的技术资料，用于指导外行人士制作变压器，由于笔者水平有限，无法保证没有错误和疏漏，为了避免“碰瓷”，做出如下声明。

在实际操作中，依据此文而产生的任何问题(包括但不局限于财产损失，人身伤亡等)与笔者无关，笔者既不赔偿，也不负法律责任。

如果您已经阅读了本资料正文的一部分或全部内容，则表明您同意了上面的这个声明。

欢迎指出文中不妥之处，欢迎给出修改建议，作者在此表示感谢。

转载此文无需经原作者同意，但不得删除或更改本页内容。

有的场合会用到铁芯变压器，例如收音机、音响、100V-110V 电器，其余场合用开关电源居多。凡是开关电源胜任的场合尽量用开关电源，因为铁芯变压器耗费材料多还过于笨重。

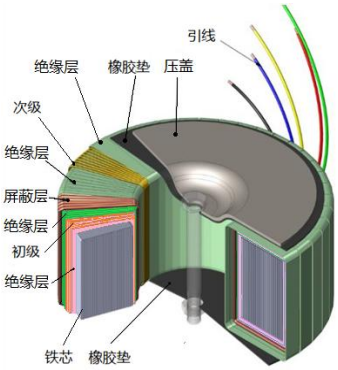
铁芯变压器有多种形状，称谓类型，例如口字、EI、C、ED、WB、R、环、O 等。由于有的类型缺陷太多，渐渐淡出了历史。目前仍大量生产的有 EI、R、环、O 少数几种类型。环型变压器相较于 EI 型，在同样的设计功率下用料更少，空载损耗更低。同容量同载荷时，环型变压器温升更低，漏磁干扰更小，效率更高，但绕线麻烦，易偏磁饱和，冲击电流大。

本文论述广义上的铁芯环型变压器，包括 R、环、O 型等，它们本质上类似(用卷绕铁芯，线圈绕铁芯上，属于“铜包铁”结构，EI 型则用叠片铁芯，线绕骨架上再装铁芯，属于“铁包铜”结构)。环型变压器俗称环牛，在本文里环牛和环型变压器是同义词。基于同样的原因，也有 EI 牛、R 牛、O 牛等说法。

本文里论述的变压器工作方式是干式，也就是说利用空气自然对流冷却工作的。工作环境不是泡油里、水里或者强制风冷，也不是全封闭的高温或低温环境。

1. 环牛结构

这里有一个环牛剖面示意图，一般环牛都是这种结构。容易看出，环牛由铁芯，初级线圈、屏蔽层、次级线圈、引线、绝缘层、固定支架等几个部分组成。现实中很多场合要求低，无需屏蔽层。



根据剖面图容易推测，制作环牛需要铁芯、漆包线、绝缘材料、引线、铜箔、固定支架等。还需要一些工具和辅助材料，例如 钳子(剪线)、线梭(穿线)、烙铁和焊锡(焊接引线)、绝缘漆、橡胶槌(敲平) 、万用表(测参数)、保险丝等。

2. 理论计算

2.1 铁芯理论容量

铁芯的截面积大小、窗口大小、磁密决定了环牛的最大输出功率。假设铁芯外径 D，内径 d，高 H，硅钢磁密 B，铁芯截面积 A，单位都是毫米，利用下表里的公式可以估算出铁芯理论容量。值的一提的是估算铁芯容量的公式有很多，但没有一个准确的，下面这个也不特别准，但能适应绝大部分应用场合。须知，铁芯容量不是个定值，跟负载类型、环境温度等多种因素有关，因此没有人能估算准确。

铁芯理论容量(VA) = 5.0 * J * B * f * W * A * 10^{-7}	铁芯质量(kg)	系数 J
公式中窗口大小 W = d^2 * 3.14 / 4，铁芯截面积 A = H * (D - d) /2，其中铁芯内径 d，外径 D，高 H，单位都是毫米(mm)。磁密 B 的单位是特(T)，交流电频率 f 的单位是赫兹(Hz)，大陆取 50Hz，系数 J 根据铁芯质量从右表用插值法选取。	0.0 --- 3.5	3.5 --- 3.1
	3.5 --- 10.0	3.1 --- 2.0
	10.0 --- 50.0	2.0 --- 1.5
	50.0 --- 60.0	1.5 --- 1.0

例如：假设有一个铁芯大约 4.95kg(片厚 0.23mm，硅钢密度以 7.65g/cm^3 计算，根据质量密度体积公式也能算出质量)，外径 145mm，内径 81mm，高度 57mm，假设该铁芯硅钢片磁密取 1.60T[后面会论述这个值怎么测出来]，则该铁芯的窗口大小是 W = 81*81*3.14/4

= 5150.385mm^2，截面积是 A = 57*(145-81)/2 = 1824mm^2，容易算出该铁芯的理论容量：5.0*J*B*f*W*A *10^{-7} = 5.0 * 2.5 * 1.60 * 50 * 5150.385 * 1824 * 10^{-7} = 939.4(VA)

2.2 漆包线用量

2.2.1 初级匝数

匝数公式如下。

$$N(t) = \frac{U(230V) * 10000}{\sqrt{2} * \pi * f(50Hz) * A(cm^2) * B(T)}$$

U:电压，单位伏V
N:匝数， t=turns
f:交流电频率，单位赫兹Hz
A:铁芯有效截面积，单位平方厘米cm^2
B:最高工作磁密，单位特T

大陆电压一般 220-240V，个别地区电压高时能上 250V，而有些地区不足 200V，计算时取电压最高值，笔者所在地区平时大约 230V，后半夜和凌晨电压要高一点。

交流电频率大陆 50Hz，变化通常在 1Hz 之内，可以忽略。

硅钢磁密的高低依赖于材质和热处理工艺，这个值应该从铁芯所用硅钢牌号的激磁曲线查到，通常取在硅钢磁化曲线的拐点下方。作为例子，这里假设查得 B 取 1.60T[如果不知道硅钢片牌号，后面有方法介绍怎么去测出这个值]。

A 是铁芯截面积，用前面那个铁芯做例子，A=H(D-d)/2=5.7*(14.5-8.1)/2=18.24cm^2

初级理论匝数：N=(230*10000)/(1.414*π*50*1.60*18.24)=355(t)

2.2.2 初级线径

根据最大电流和导体电流密度，可求出漆包线直径[不含漆膜厚度]: d=sqrt(4*最大电流/π /单位面积载流量)，sqrt 表示开平方(来自英语中的 square root)。

上面铁芯理论容量大约 939VA，假设电压有效值是 220V[不应该用 230V 计算，因为电压有个波动范围，一般就 220V 左右]，则电流大小为 I=P/U=939/220=4.27A。

电流密度取值由发热和散热水平决定，对于自然对流冷却干式环牛[大多数小功率环牛是这种工作状况]，一般每平方毫米纯铜漆包线载流量取 3A 左右，前面计算铁芯容量使用的系数 J 就是载流量。如果环牛功率很小，可以取 3.5A，如果环牛功率偏大，可以取 2.5A 甚至 2.0A 或更低。如果环牛工作条件恶劣，散热很差，环境温度很高，则每平方毫米铜线的载流量不应该超过 2.5A，如果环牛在冰冷的环境里工作或者多数时间非满负荷运行，载流量可以取大一些。

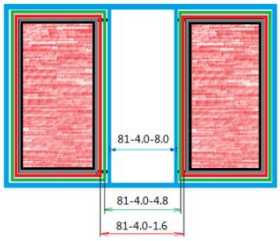
如果载流量取 2.5A/mm^2，算出初级线径[不含漆膜厚度]d=sqrt(4*4.27/3.14/2.5)=1.48mm，理论线径是非标准线径，可选相近的线径 1.5mm。多数厂商标称线径不含漆膜厚度。

2.2.3 初级漆包线用量

a)初级各层匝数

每层匝数=内径周长/(导线直径*系数)，前面的铁芯内径 81mm，窗口很大，漆包线直径可以适当取的粗点，例如 1.6mm[新手不要这么做，防止次级空间不足]。人工绕线误差很大，由于业界线径默认不算漆皮厚度，但漆膜确有一定厚度，线与线之间会有缝隙，由于金属

有韧性，线圈会起拱，焊接引线也占用额外空间。为了方便计算，通常在原始线径基础上乘个大于 1.0 的系数。我这里的系数取 1.17，实际应该取多大依赖于线径和绕线水平。假设铁芯内圆和初级之间绝缘厚度 2.0 毫米，前面例子的初级各层匝数计算如下：



第一层：π*(81-2.0*2-1.6)/(1.6*1.17)=126(t)

第二层：π*(81-2.0*2-1.6*2-1.6)/(1.6*1.17)=121(t)

第三层：π*(81-2.0*2-1.6*4-1.6)/(1.6*1.17)=116(t)

三层绕满已经超过 355 匝了，为了平整仍然可以绕三层，共 126+121+116=363 匝，匝数比理论值多 8 匝。由于铁芯窗口充足，而且线粗增加的电阻小，因此不必太计较。

b) 初级漆包线长

中层截面积是个近似的矩形[左上图绿颜色的线周长]，则这个矩形的理论周长=四个边长之和=[(57+4+4.8)+((145-81)/2+4+4.8)]*2/1000=0.213(m)

理论上 363 匝的线总长=0.213*363=77(m)

c) 初级绕组漆包线质量

根据质量、密度、体积的关系容易得知：m=PV=PAL

上式中，铜的密度 $P=8.89*10^3 kg/m^3$，漆包线[忽略漆膜厚度]的截面积:
$A=\pi d^2/4=3.14*1.6^2/4=2.0096mm^2$，L 是初级绕组的漆包线总长，前面已求出 L=77m

漆包线用量[不考虑漆膜质量]$m=PAL = 8.89*10^3*2.0096*10^{-6}*77=1.38(kg)$

2.2.4 次级

根据 N/n=U/u 计算次级匝数，初级 N=363t，电压 U=220V，次级电压 u 根据需求来定。假设次级有 6 组，其中 4 组 24V，电流 7.5A，还有 4 组 12V，电流 4.56A，合计 939VA 功率。

则 24 伏的次级匝数每组 n=24/220*363=40t，实际绕线时可适当多绕几匝，因为接上负载后电压会下降一定的比例，称谓电压调整率。载流量还是按照 $2.5A/mm^2$ 来计算，此时理论线径为：sqrt(4*7.5/3.14/2.5)=1.95mm，可选 2.0mm 线径的漆包线。

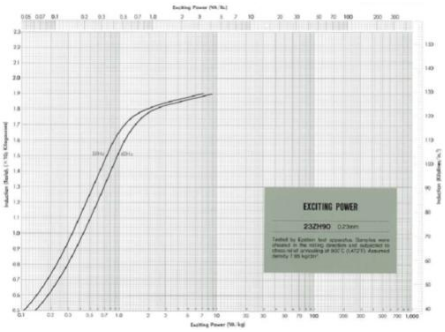
12 伏的次级每组匝数 n=12/220*363 =20t，考虑电压调整率，实际绕线可适当多绕几匝。载流量按照 $2.5A/mm^2$ 计算，则线径为：sqrt(4*4.56/3.14/2.5)=1.52mm，可选 1.6mm 线径的漆包线。

次级漆包线用量可以参照前面计算初级用量的方法估算出每种线径对应质量。

3. 铁芯最大工作磁密

前面那个例子里的磁密 B，一拍脑袋就取了 1.60T，显然不合理。现实中，不同厂家生产的铁芯质量有很大差异，即使同一厂家生产的同一批铁芯，也可能差距巨大。更何况 DIY

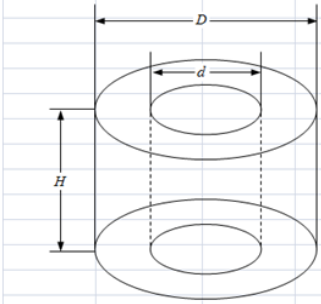
通常购买拆机铁芯，根本不知硅钢的牌号。就算能找到硅钢的牌号，铁芯的实际导磁水平很多时候也会跟厂家公布的数据差距甚远。



硅钢是炼钢厂生产的，炼钢厂实验室会提供硅钢板材的各种参数，铁芯加工厂[也可能就是变压器厂]会从某个炼钢厂或者硅钢板材分销商那里成吨的购买某种牌号的硅钢板料，买回来裁剪和卷绕加工成各种形状和各种大小的铁芯或硅钢片，这个加工过程中可能会损坏部分原有涂层，也会产生新的应力导致磁性能变差，因此需要再次消应力处理和涂绝缘层[他们是不是真的这样做了或做到什么程度那可不好估计]，此时铁芯的磁性能参数已经和炼钢厂实验室提供的硅钢板材性能参数大相径庭。变压器厂把铁芯做成变压器，变压器销售后组装入设备，设备服役多年被淘汰当废品出售，废品里拆解出变压器，变压器被暴力分解成铁芯和铜线，铁芯卖到了 DIY 者手里，此时铁芯的磁性能已经无法预计是什么样子。

为了测得必要的参数，需要一个交流供电电源，这个电源可以是调压器，也可以是输出几十伏的隔离变压器，此外还需要一个交流电流表和交流电压表。

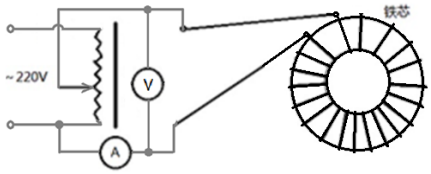
测试匝数	铁芯截面积	铜电阻率	
64	12.775	1.72E-08	
	高H(cm)	内径d(cm)	外径D(cm)
	5	5.98	11.09



3.1 电压法

根据前面的匝数公式，计算出电压 U 和磁密 B 的关系。对于一个特定的铁芯，铁芯截面积 A 是已知的，交流电频率 f=50Hz，当匝数 N 一定时，电压 U 和磁密 B 的关系就很容易推算出来。假设有调压器，这样电压 U 就很容易的改变。

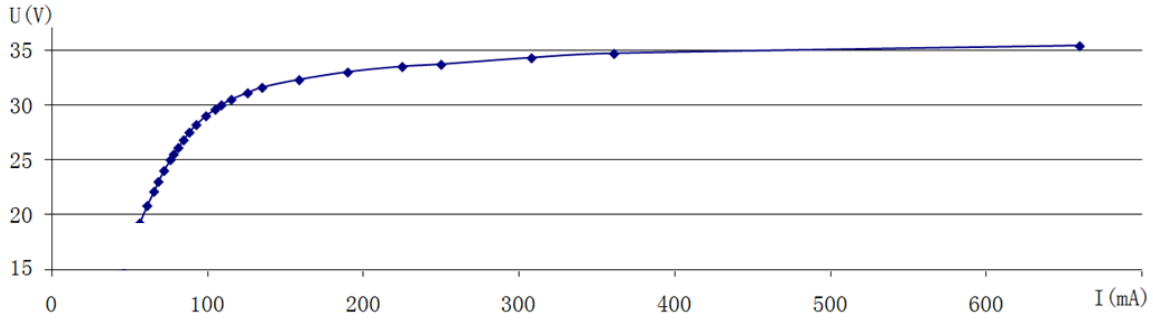
作为例子，有个铁芯 2.7 公斤，测量出铁芯外径 D=11.09cm，内径 d=5.98cm，高度 H=5.0cm，计算出铁芯截面积(A=H(D-d)/2=12.775cm^2)，在铁芯上绕线 64 匝(大铁芯可以少绕点匝数，小铁芯多绕点匝数，一般而言，匝数绕多点测试准确度高)，根据左下边接线图接线。



转动调压器手柄，从 0 开始逐渐升高电压，观察电流表读数变化，记下电压和对应电流值。通常电流值应该成近似线性增加，当电压达到某个值时再继续增加电压，电流不再按照线性预期值增加，而是突然增大很多，这个点就是拐点，称之为膝点。

实际描图时，电压每格可以取 0, 5V, ...35V 等，电流每格可取 0, 100mA, 200mA, ... 500mA 等，描出电流-电压关系曲线图，很容易找到膝点计算出对应 B 值。

电压电流关系如下图，容易看出，当电压在 27.5V～30V 时开始拐弯逐渐进入饱和区域。上面的图中描点都源自下表数据。表中前两列是测得数据，其余都是推导得到的[220V 匝数根据匝数公式计算得到，220V 下空载电流根据能量守恒换算出来。

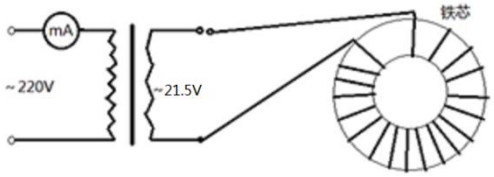


测试电压(V)	电流(mA)	磁密(T)	220V 理论匝数(t)	220V 理论空载电流(mA)
19.2	56.5	1.058	733	4.9
20.8	61.2	1.146	677	5.8
22.1	65.6	1.218	637	6.6
23	68.4	1.267	612	7.2
24	72	1.322	587	7.9
25	76.2	1.377	563	8.7
25.5	78.2	1.405	552	9.1
26.1	81.2	1.438	539	9.6
26.8	84.6	1.477	525	10.3
27.5	88.3	1.515	512	11.0
28.2	92.8	1.554	499	11.9
29	99	1.598	485	13.1
29.6	105	1.631	476	14.1
30	108.9	1.653	469	14.9
30.5	115.3	1.680	462	16.0
31.1	125.7	1.713	453	17.8
31.6	135.1	1.741	446	19.4
32.3	158.8	1.779	436	23.3
33	190	1.818	427	28.5
33.5	225	1.846	420	34.3
33.7	250	1.857	418	38.3

3.2 匝数法

如果没有调压器找一个隔离变压器也行，输出电压几十伏。根据前面的匝数公式计算出匝数和磁密 B 的关系。

原理是：假设电压是 U，B 取 1.0T，计算出此时需要绕制的匝数，逐渐减少匝数，观测电流值变化，一般是近似线性变化，当匝数减少到某个值时，电流突然增大很多。这个点就是膝点，计算出此时的 B 值。实际计算变压器初级匝数时，B 的取值不要超过这个值。



需要注意，右图里用的电流表[笔者用的计量插座]串联在左边，是测试的变压器初级通过的电流，并不是要测试的铁芯绕线里通过的电流，我们仅仅想找到膝点，并不关心实际电流到底多大，如果想关注电流到底多大，则最好串联在右边。如果不怕麻烦，想测铁芯绕线每次通过的实际电流可能需要用交流安培表，因为电流有可能比较大，而且有冲击。

假设有一个变压器，输出电压 21.5V，下面用匝数法测试了一个 Talema 铁芯的参数。

该铁芯重 7.8kg，外径 150mm，内径 80mm，高度 80mm，片厚 0.27mm。容易算出截面积是 28cm^2，则 21.5 伏时需要绕制匝数 N=(10000*21.5)/(4.44*50*28.0*B)，化简变换可得： B = 36.4086/N，容易看出 N 和 B 之间是线性关系。

在铁芯上绕线 30 匝，逐渐减少匝数，记下对应电流大小，算出对应磁密。注意，测试中一定要确保 220V 交流电质量[后面有过滤市电直流分量的办法]，保证变压器空载电流基本恒定，否则就算不接负载，毫安表的电流都可能从几十毫安到几百毫安之间变化，接上负载后的电流那点变化就被完全被淹没了。

绕线匝数(t)	毫安表读数(mA)	磁密(T)	电流变化(mA)
30	25	1.2	
28	30	1.3	5
26	32	1.4	2
24	40	1.5	8
23	48	1.6	8
22	62	1.65	14
21	109	1.73	47
20	210	1.82	101
19	405	1.92	195

根据电流变化差值，从上表中[如果描出曲线图则直观]容易看出，22 匝减少到 21 匝时电流暴增，容易想象本铁芯材料磁化曲线拐点在 1.60～1.73T 之间。实际绕变压器时不宜取 1.73T，应该取 1.6T 甚至更低。参考前面计算方法，容易计算出初级需绕 231 匝(假设最高电压 230V)。根据前面容量计算方法，用插值法估计铁芯容量 1.5KVA 左右，初级线径可取 1.8mm～1.9mm。

3.3 估计法

假设环牛铁芯每公斤硅钢片的损耗控在 1VA(老铁芯 1.2VA)以内，可以根据损耗来推测磁密大小。这看上去很荒唐，实际操作起来比前面介绍的两种方法都简单。为什么不是 2VA 或 0.5VA 等，观察各大炼钢厂硅钢片的电流激磁曲线会知道这是一个综合的结果。从下表容易看出，以 W/kg 比 VA/kg 为单位时对应的值靓丽，尤其铁芯接近饱和时更加明显。

TABLE 1 – TYPICAL VALUES OF CORE LOSS
At 50 Hz And 60 Hz For Typical Sheet Specimens

Flux Density, T	Core Loss, (W/kg) -- ASTM A804			
	0.23 mm X-0 CARLITE DR		0.27 mm X-1 CARLITE DR	
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
0.9	0.1883	0.251	0.222	0.297
1.0	0.232	0.309	0.273	0.365
1.1	0.280	0.373	0.330	0.441
1.2	0.334	0.445	0.393	0.525
1.3	0.394	0.525	0.462	0.616
1.4	0.460	0.613	0.537	0.715
1.5	0.536	0.711	0.619	0.825
1.6	0.619	0.819	0.711	0.945
1.7	0.730	0.961	0.830	1.099
1.8	0.893	1.165	1.007	1.323
1.9	1.242	1.594	1.362	1.773

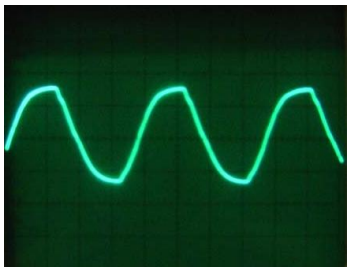
TABLE 2 – TYPICAL VALUES OF RMS EXCITING POWER
At 50 Hz And 60 Hz For Typical Sheet Specimens

Flux Density, T	Exciting Power, (rms VA/kg) -- ASTM A804			
	0.23 mm X-0 CARLITE DR		0.27 mm X-1 CARLITE DR	
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
0.9	0.205	0.250	0.1711	0.210
1.0	0.248	0.302	0.207	0.255
1.1	0.300	0.365	0.253	0.311
1.2	0.365	0.444	0.315	0.385
1.3	0.450	0.546	0.398	0.487
1.4	0.553	0.670	0.504	0.614
1.5	0.698	0.846	0.656	0.799
1.6	0.882	1.067	0.852	1.030
1.7	1.294	1.568	1.280	1.548
1.8	2.37	2.889	2.42	2.93
1.9	9.65	12.050	11.01	13.54

假设手头有一个输出 30V 的隔离变压器和一个交流安培表。有一个铁芯 4.8kg，截面积 19.25cm^2，先假设膝点磁密 1.4T，则根据匝数公式计算出绕线匝数应该是 50 匝，预期电流是 4.8kg/30V*1000 = 160mA，绕 50 匝通 30V 交流电。如果空载电流显著大于 160mA 则磁密按照 1.2T 计算，需要绕线 59 匝，在原匝数基础上加绕 9 匝再测电流值。如果空载电流显著小于 160mA，则磁密按照 1.6T 重新计算匝数，需要绕线 44 匝，在原来 50 匝基础上减少 6 匝再测电流值。按照这种方法，很快就能找到接近 160mA 空载电流的磁密，用这个磁密值，市电最高电压，铁芯截面积，很容易计算出初级应绕匝数。

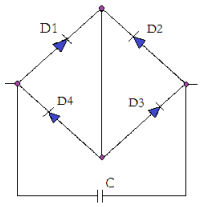
笔者用这种方法筛选铁芯，磁密 1.5T 以下铁芯丢弃不绕。仍以 4.8 公斤那个铁芯为例，30V 交流电应该绕 44 匝，测出电流如果小于 160mA 则为“合格”，否则当废铁处理。

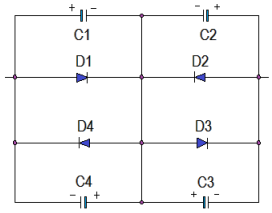
4. 过滤市电直流分量



市电未必是严格的正弦波，有时正负半周波形轻微不对称，此时会导致环牛铁芯极化偏磁饱和，初级电流暴增，噪音增大，严重时甚至烧毁过流保险管或环牛温度保险丝。变压器铁芯质量越好受影响越严重，因为铁芯质量好磁漏小，所以受影响厉害。很多 DIY 者抱怨环牛平时很安静，有时电压虽然很低环牛却有噪音，通常就是市电波形不好导致。

笔者做过实验，电吹风和环牛插头插在同一个插排上，开电吹风低档时，平时空载 8mA 的环牛此时空载电流突然增加到 1A 多，而这个环牛也仅 200VA 的容量，800VA 的 O 牛平时空载 14mA，开吹风机低档时环牛空载电流暴增到 3.6A 以上。可见交流电波形对环牛影响有多严重。





波形轻微不对称相当于有直流分量，过滤市电直流分量需要一个桥堆(或者 4 个二极管)和 2~4 个低压电容组成左面的任意一个电路即可。桥堆最大电流是变压器初级最大电流的 2 倍以上，电容耐压值 3V 以上即可，容量一般 2200 微法以上(太小效果不明显)，但过大也没必要，因为市电直流分量一般没多大。这些元器件成本很低，制作出来却能很好的对付市电波形差的场合。

另外，很多人都知道，环牛输出不能用半波整流电路，因为这会导致铁芯偏磁饱和，此时环牛嗡嗡响，噪音很大，初级电流很大，发热严重。其实何止环牛输出不能半波整流，EI 牛输出半波整流时功率稍大也嗡嗡响，噪音大，电流大，发热厉害。

5. 铁芯

对于一个环牛而言，铁芯最为关键，因为铁芯好坏直接影响输出功率大小，漆包线用量，绕线难度。单位质量的漆包线价格高于硅钢片，用不好的铁芯绕变压器得不偿失。

衡量铁芯好坏前提条件是：假设每公斤铁芯损耗控制到 1VA 以内，磁密越高越好。如果不在乎损耗，用烂铁和高档硅钢做变压器没有分别。

铁芯的磁密高低和损耗水平只有测过才知道，外表看不出来，DIY 购买时的运气成分很大，尤其二手。商人可能乱标牌子，哪种好卖就标哪种很常见，因为 DIY 者也无法分辨。如果

能从电力变压器厂或为电力变压器供货的铁芯厂买到正宗的铁芯最好，否则买二手整带铁芯或洋垃圾变压器拆铁芯再利用，断带铁芯不值得动手。

6. 漆包线

不应该等到绕组绕好后再测漆包线电阻，购买漆包线后就应该根据质量计算出电阻然后和铁芯欧姆表测得的实际电阻比较，如果实际值显著高于理论值则说明漆包线质量太差。

假设有 2kg 直径 2mm[不含漆膜厚度]的漆包线，那么它的电阻值理论上不应超过 0.4Ω，看下面计算过程。

导线的电阻公式 $R = pL/A$，p 是导体电阻率，L 是线长，A 是截面积

质量跟体积的关系式 $m = PV = PAL$，P 是导体密度，A 是截面积，L 是线长

由上面两式容易推导出 $R = pm/(PA^2)$

铜的电阻率 $p = 1.72*10^{-8}\Omega\cdot m$，密度 $P = 8.89 * 10^3 kg/m^3$

截面积 $A = \pi d^2 / 4 = 3.1416 * (2 * 10^{-3})^2 / 4 = 3.1416 * 10^{-6}$，质量 $m = 2kg$

则电阻 $R = 1.72 * 10^{-8} * 2 / [8.89*10^3 * (3.1416 * 10^{-6})^2] = 0.392\Omega$

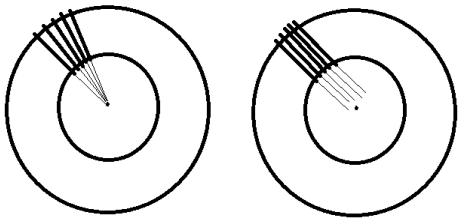
如果购买的这 2kg 直径 2mm 的漆包线实测电阻显著大于 0.4Ω，则说明质量太差。

漆包线除了导电能力还应该测试绝缘层的绝缘强度和耐热温度。只不过一般的 DIY 朋友没有专业测试设备，只能看看外观是否光滑，是否有起皮，对折弯曲时绝缘层是否裂纹或脱落等等这种目测指标是否合格了。

漆包线耐热温度是有标准的，A 级 105℃，E 级 120℃，B 级 130℃，F 级 155℃，H 级 180℃，C 级 200℃。如果耐热温度更高则直接用温度表示。到底是不是真的能达到声称的耐热等级，DIY 者很难测。

漆包线质量差距很大，考虑所处的现实环境，用廉价的铜漆包线，线径稍粗点降低电阻，浸漆弥补漆膜针孔等缺陷。

7. 绕线



理论计算很简单，但到实际绕线时可能遇到事先想不到的问题。常见的问题之一是绕线方法有问题，导致绕组电阻大，磁漏也大。应该沿着最短的方向绕线[漆包线沿着半径方向绕制时，每匝的延长线都尽量穿越圆心]也就是沿着漆包线用量最少的方向绕制，从而尽量减少绕组的电阻，漏磁控制到最小，见右侧图里左图。示意图中右图的绕线方法属于分组，也比较常见，这会增加漆包线用量和绕组整体电阻，还会导致漏磁增大。相信很多人见过环牛用铁罩子罩起来隔磁吧，尽管不一定是绕线导致的磁漏超标。

实际绕线时，尽可能避免分段或者分组。由于通常需要绕多层，每层未必刚好跟理论值相符，此时为了绕平整，相邻层必须相差那几匝[按照理论计算]。避免过度拥挤或线拉的过

紧，否则容易局部起拱，导致后面的层绕不平。再者，尽量不要出现非整层的情况，如果最后一层没有办法刚好整层[会导致后面绕组空间不足或实际匝数跟理论值相差太多]，则均匀分布在圆周上。

一般而言，手工绕线相对比较整齐，漏磁小，绕线机自动绕线比较乱，漏磁大，只不过手工绕线生产率低。内圆一匝挨着一匝密密绕，外圆均匀散开是最理想的绕线方式。

对于音响和医疗设备上用的环牛，有时为了输出两组相同大小的电压，需要双线并绕。这种绕法的优点是一致性非常好，也就是说这两个次级线圈的输出电压大小几乎完全相同，线圈内阻几乎完全相同。

如果不用考虑适应国际电压，初级线圈一根线从头绕到尾最好，如果初级线包不止一层，靠近铁芯的线头引出接市电火线，这样外电场弱一些，机壳感应电压低得多。

8. 屏蔽层

全名是静电屏蔽层，使用覆绝缘膜的金属箔压制，也以自制，国外也有出售的厂家，但国内较少。可用厚度 0.05-0.1 毫米单面带胶的铜箔粘到绝缘胶带(或者聚酯薄膜带)上，铜箔宽度要适中，(几百伏安的环牛用的屏蔽层铜箔宽度一般 10-15 毫米)，胶带每边露出宽度都要超过铜箔宽度 2 毫米以上，防止缠绕时短路。例如，铜箔宽度 10 毫米，胶带宽度 20 毫米，铜箔粘到胶带上，胶带每边富裕 2-5 毫米。缠绕到变压器上后一端焊引线引出，焊点不应该有毛刺。烙铁温度较高时，焊引线时容易损坏铜箔上的绝缘层，损坏位置需要重新做好绝缘。

绕屏蔽层以最外圆算(绕线圈刚好相反，以内圆算)，一匝挨着一匝绕，稍微压点边不漏初级线就行，内圆会有较大覆盖，这样就相当于把初级全部包起来了。

注意：屏蔽层用的导金属箔一般用铜箔，不宜用铝箔代替铜箔，因为铝箔太难焊接。铜箔不宜太厚，一般 0.05-0.1 毫米足够，胶带厚度也是 0.05-0.1 毫米，太厚不容易施工。常见的玛拉胶带绝缘好而且便宜，但延展性太好，容易拉断敷上的铜箔，长期耐温 90 度。金手指胶带能长期耐温 180 度以上，做屏蔽层更好一些，但价格偏高。PET 胶带价格适中，长期耐温 120 度以上，适合大多数场合。

9. 绝缘

做变压器特别重要的一点是绝缘，这事关人身安全。如果用塑料性质的胶带做绝缘则不能浸漆，因为绝缘漆不能透过塑料。如果用绝缘布或者非压膜绝缘纸绝缘则应该浸漆处理，浸渍自干漆可以省去烘干的烦恼。自干漆虽然没有烘干漆那么好的韧性，但也能胜任，因为变压器不像电机那样强烈震动。

铁芯上应该绕足够厚的绝缘层，通常铁芯倒角后用 0.15-0.25 毫米厚的玻璃纤维布绕 4 层(以外圆算)以上并浸漆处理，如果不做浸漆处理，也可以用聚酯薄膜或绝缘纸配合绝缘胶带绝缘，最好不要只用绝缘胶带做绝缘层，因为绝缘胶带机械强度比较差。如果铁芯窗口不富余，可以贴绝缘纸节省窗口，优点是外圆和内圆绝缘层一样厚，如

果绕绝缘带，由于内圆半径小，外圆铺满一层，内圆会多于一层，内圆白白过厚却没意义，因为击穿强度依赖于薄弱的外圆绝缘。还要注意初级绕组和屏蔽层之间，屏蔽层和次级绕组之间的绝缘，绝缘层厚度不能太薄，否则很难通过标准里要求的初次级间耐压测试。

绕屏蔽层前最好浸漆，浸漆好处非常多，防止铁芯生锈，防止漆包线针孔打火，防止漆包线受潮长绿锈，加强散热，减小工作噪音等等。如果初级和次级之间有静电屏蔽层，初级绕组和静电屏蔽层之间，静电屏蔽层和次级绕组之间都要做绝缘处理。由于静电屏蔽层不透漆，初级浸漆干燥后才能绕静电屏蔽层。绝缘漆的导热系数通常比空气高一个数量级，因此浸漆后初级产生的热量更容易传导出去。

本着经济实用的原则，初级和铁芯之间可用玻璃纤维布或绝缘纸绝缘，初级和次级之间可用绝缘纸或玛拉胶带绝缘，次级对外可用 PET 或玛拉胶带绝缘。按照次序，笔者习惯用玻纤布、PET 胶带、玛拉胶带。

注意：为了充分浸漆，泡漆时间不应该低于 8 小时，建议 24 小时以上。需要特别指出的是，绝缘漆或多或少都有一定的毒性，尤其对呼吸器官损害较大，浸漆前应该做好充分防护，比如口罩，护目镜，面具等，皮肤最好不要直接接触绝缘漆。

10. 引线

环牛应该焊接引线引出，最好不要漆包线直接拉出，这样不但可以避免刮伤漆皮，而且避免了漆包线根部应力集中断裂。常用引线有多股电子线、硅胶线、特氟龙线等。值得一提的是引线的塑料外皮不耐漆，泡漆后韧性变差，用久了容易开裂。因此，浸漆时不要泡到电子线和特氟龙引线(可事先套一层热缩管)。

细漆包线去掉漆皮在引线接头上绕成螺旋状溶满锡，粗漆包线去漆皮用细线捆住引线接头溶满锡。引线和漆包线接头交错长度不应低于三倍线径。理论上引线的线芯截面积不应小于漆包线截面积。

引线常用的有电子线，硅胶线，特氟龙线。电子线通常用的比较多，因为价格低廉而且皮厚耐刮，一般耐热 105 度(低档次的耐热 80 度)，缺点是线皮硬，泡漆后容易老化开裂。因此，如果浸漆，应该有防护措施，例如，可用热缩管套住。硅胶线比较软，指甲一抠就能掉一块线皮，价格比电子线略贵，但不怕漆泡，浸漆场合是个不错的选择。镀锡特氟龙线多数线硬弯曲难，漆泡后线皮容易老化开裂，不建议用，镀银特氟龙线除了焊接容易再无优点，因此也不建议用。

引线焊点应该光滑无毛刺，焊接完毕后用绝缘套管套住，套管可选玻纤管或者黄蜡管或硅胶管，最好不要只套一层热缩管，因为热缩管耐久性差，易老化开裂。

11. 保险丝

环牛需要使用慢熔保险丝，因为通电瞬间可能会有很大的冲击电流，有冲击电流的原因是铁芯剩磁。不过冲击电流持续时间很短，一般不超过交流电半个周期，通常小功率环牛使用慢熔保险丝就可以了，大功率环牛则可能需要用到慢启动板防止通电瞬间跳空开。

温度保险丝可以用也可以不用，因为温度保险丝响应非常慢，而现实中长期过载烧坏的环牛极少。多数环牛尤其厂牛烧坏时温度保险丝根本不起作用，因为大多发生局部短路烧坏，温度保险丝来不及响应。进一步观察发现，这些局部烧坏的环牛绝缘都比较差，而且没有一个绕组浸漆的。分析损坏原因是漆包线有针孔，环牛绕组本身有很大电感，通断瞬间产生高压击穿薄弱环节，临近两匝上的针孔如果多次打火就烧光了表面的绝缘漆，于是金属表面就直接接触了，电压较高时瞬间就能烧断局部短路的漆包线。

12. 质量

对于一个成品环牛来说，外观有目共睹，就不用罗嗦了。绝缘很重要，因为关系到人身安全。北美标准是普通环牛初级和次级之间加 2.5KV 低频交流电 1 分钟无击穿无飞弧。环牛初级和次级电阻尽可能小，空载电流尽可能低，这样效率高，电压调整率低。下表收集了部分小牛成品初级电阻和空载电流。次级电压不同，电阻没有比较价值，这里不再给出。

变压器型号	设计功率(VA)	初级直流电阻(Ω)	230V 空载电流(mA)	价格(元)	备注
*良 4N O 牛	50	45.5	5.0	138	全新
*Tuned 6N O 牛	54	32.0	3.3	330	全新
杰*O 牛	50	29.9	3.0	144	全新
*凡 O 牛	50	32.0	3.2	142	全新
箭猪环牛	50	38.0	3.1	88	拆机
Bicron O 牛	50	21.2	5.5	198	拆机
太阳花环牛	50	24.4	5.4	100	拆机
Talema 环牛	50	29.8	3.0	78	拆机
英国 AVEL 环牛	55	31.5	2.7	102	拆机
DIY O 牛 1	50	18.9	2.7	----	DIY
DIY 环牛 1	50	20.7	2.7	----	DIY

为了减少对周围器件干扰，环牛漏磁应尽可能小，例如 某些仪器设备里的环牛还有漏磁屏蔽罩。为了减少市电高频杂波干扰，环牛初级和次级之间有全封闭的屏蔽层，例如 音响用的环牛有有些有屏蔽层。此外，接线应为多股引线，漆包线直接拉出的做法不值得提倡。

13. 性价比

有目共睹，国产铝线牛性价比最高，其次是大厂牛，再其次是定制牛，然后是洋垃圾，最后是全球购。买天朝奸商的变压器最省心，前提是用银子交智商税买质量很一般的货。铝线牛和大厂牛被多数 DIY 者深恶痛绝，在此无需赘述。笔者从定制牛开始入坑，拆过十多家信誉极好的卖家制作的高档环牛，发现工艺之先进和用料之奢华简直不能再良心。

1) 铁芯，不论什么价格，一色的国产烂铁冒充高档进口(新日)铁，无一例外。

2) 铜线，用渣铜线已是业内潜规则，有的商家还要标几个 N 更上一层无耻楼。

3) 绝缘，无一达标(北美)，初级和次级间加 2.5KV, 50Hz 交流电 1 分钟全部击穿。

4) 屏蔽，不论额外收不收钱，没有全封闭的屏蔽层，全部都是糊弄一下完事。

5) 引线，多数都是漆包线套热缩管直出，即使个别焊引线，用料也很渣，上锡困难。

6) 灌封，诱导环氧树脂灌封，既能多赚点还能防拆见到内部垃圾做工和用料真面目。