

试论电子管输出变压器及扼流圈参数的测试方法

张浩元

随着音频技术向数字化的发展,在现代各种先进的测试技术的支持下,功率放大器的技术得到高速发展。功放的失真度指标也越来越低,特别是晶体管功放的失真度要远低于电子管功放。但客观听音表明,电子管功放的听觉柔美感要优于晶体管功放,这已是一个不争的事实,这也是最近电子管功放东山再起的原因。由此引发了音响界的一股胆机及大量爱好者自己组装胆机功放的热潮。但随着这股热潮的深入发展及现代人们听音水平的提高,责难胆机功放低音下潜不足、高频响应不足的声音时有发生。其实产生这一问题的原因在于输出变压器。笔者翻阅订阅的1978~2006年近30年的《无线电与电视》,发现里面关于输出变压器及扼流圈设计及制作的文章很多,但关于输出变压器的测试方法却很少。而一个输出变压器无论如何设计及制作,判断好坏的标准最终还是以正确的测试数据为依据。这足以说明测试的重要性。

另外,输出变压器不同于电阻、电容测量,它既有集总参数(电感量、直流电阻),又有分布参数(漏感、分布电容)。因此常规的测试方法和测量仪器较难用于输出变压器的测试,而必须用专用设备测试。老式一点的如各种交流电桥,新一点的如数字式AV2781电感测试仪,专用的如TF6881A电感综合测试仪,一次就能测出输出变压器的电感量、

漏感、Q值等,而这些测试设备并不是每个人都拥有的。因为这些设备的测试原理还是建立在电工学基础上的,所以下面介绍一种用爱好者拥有的常规设备,根据电工学的基础知识,进行变通测试,然后进行计算,最后也能得到准确的测试结果。

一、主要参数

决定输出变压器好坏的参数主要有以下几种:

- (1) 自感量(确定低频下限)
- (2) 漏感(确定高频上限)
- (3) 分布电容(影响高频上限)
- (4) 直流电阻(影响效率)
- (5) 单端输出变压器及扼流圈气隙大小(影响最大电感量)
- (6) 频率响应(输出变压器综合参数判断,确定质量好坏的最后结果)

二、测试方法

1. 自感量的测试

电感的测试有以下3种方法。

(1) 伏特计—安培计测量法。用这种方法可以根据元件上的电压U和通过元件的电流I来计算元件的阻抗Z, $Z=U/I$, 则被测电感 $L_x=U/\omega I$ 即俗称的伏安法。通常低频大电感测试采用此法。由于输出变压器铁心中的铁磁材料的非线性,在不同频率、电流、电压下的电感量也不同。采用伏安法测试,更能模拟实际工作状态,

测试结果更准确实用。

(2) 谐振测量法。利用并联谐振原理,通常对高频小电感进行测试。

(3) 电桥测量法。利用交流电桥直接测量。

下面重点介绍伏安法。由于输出变压器有两种规格,分无直流磁化(推挽输出变压器)、有直流磁化(单端输出变压及扼流圈),因此必须分别采用不同的方法。

① 无直流磁化。测试原理如图1所示。电位器W调整信号发生器G(信号发生器最好带有功率输出)所需频率的电流,由毫安计I指示,同时用电子毫伏表量出被测电感两端电压,则被测电感可用式(1)算出。

$$L_x = U / (6.28 \cdot F \cdot I) \cdots (1)$$

其中, L_x 单位H, F单位Hz, I单位A。

对于输出变压器,由于工作频率接近市电频率,也可利用市电直接测量,电路如图2所示。电阻R1取值100Ω,主要是便于测

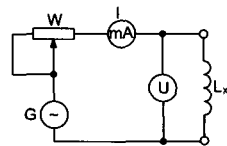


图1 无直流磁化测试图

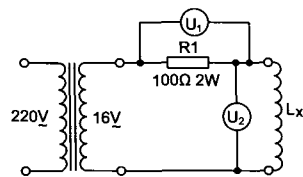


图2 利用市电测量电路

试时计算。

$$I = U_1 / R_1 \quad \cdots (2)$$

由于市电频率为 50Hz, 则

$$L_x = U_2 / (314 \cdot I) \quad \cdots (3)$$

测试实例: 一只输出变压器实测 $U_1 = 0.21V$, $U_2 = 16.38V$, 则

$$L_x = 16.38 / (314 \times 0.0021) = 16.38 / 0.6594 = 24H$$

该变压器在 TF6881A 电感综合测试仪上实测为 21.5H, 因为测试条件不同, 则结果也不同, 对照表 1 更能说明产生误差原因。误差不超过 10%, 表 1 的测试结果更符合实际工作情况。

②有直流磁化。测试电路如图 3 所示, 50V 直流电源由变压器 T 提供, 也可由独立 50V 直流电源提供不超过 150mA 的磁化电流, 调节电位器 W 到所需磁化电流值, 并由毫安计 I 指示, 测出 U_1 、 U_2 值, 根据式(2)、(3) 计算。

结果就是该变压器(或扼流圈)在该变压器(或扼流圈)规定的磁化电流下的实际电感量。

测试实例: 以前述变压器为

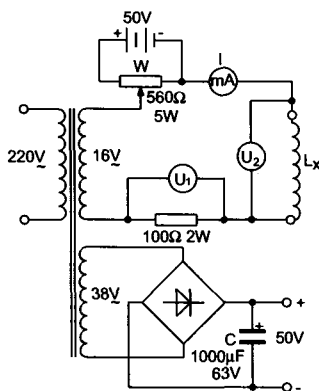


图 3 有直流磁化测试图

例, 送入 50mA 磁化电流后, U_1 为 0.295V, U_2 为 16.38V, 根据式(3) 得

$$L_x = 16.38 / (314 \times 0.00295) = 16.38 / 0.926 = 17.69H$$

表明上述变压器在 50mA 磁化电流条件下, 电感量由 24H 下降为 17.69H。

2. 漏感的测试

标准的测试方法如图 4 所示。用短路线将二次侧绕组短路, 然后用交流电桥直流测短路二次侧线圈后的一次侧线圈的电感量(二次侧线圈如果有反馈绕组时, 所有的二次侧线圈必须全部短路)。测出的值就是漏感 L_s 的值。

从图 4 中可以看出, 短路负载以相当小的 $n^2 L_s$ 值对一次侧电感分路, 所以实际上测得的恰好是电路中的泄漏电感。

考虑到个人有交流电桥的情况较少, 更不用说拥有 TF6881A 电感综合测试仪了, 因此可以利用音频信号发生器(内部最好带功率输出, 如无可外接功率输出)和 DA-16 毫伏表(如无毫伏表, 可利用数字万用表的交流电压档代替, 通过和 DA-16 毫伏表比较, 频率特性在 5kHz 以下时误差不超过 5%, 超过 5kHz, 误差超过 50%~100% 以上)配合进行测试。

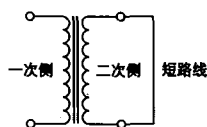


图 4 漏感测试电路一

利用信号发生器配合数字万用表, 用电压比较法, 测试电路如图 5 所示。配合公式

$$L_s = R_0 / 2 \pi f \quad \cdots (4)$$

进行计算, 也能较准确地测出漏感 L_s 值, 通过和 TF6881A 电感综合测试仪进行比较, 该输出变压器在 TF6881A 电感综合测试仪上用频率 5kHz、电压 1V、电流 1mA 测试, 漏感 L_s 为 15.5mH, 用图 5 电路测试, 漏感 L_s 为 25mH。通过比较, 误差为 40% 左右, 是正误差。在电压比较法中, 由于短路损耗电流在一次侧线圈直流电阻上的电压降, 是造成这 40% 左右正误差的直接原因。此法虽然不很准确, 但对没有专业仪器的爱好者来说, 也不失为一个切实可行的较好方法。

测试方法如下: 调整信号发生器和输出频率为 5kHz, 调整 W 使电压表 U_1 和 U_2 指示一致, 取下电位器 W 测量其阻值为 R_0 , 然后代入式(5) 计算, 结果则为漏感 L_s 值。

$$L_s = R_0 / (6.28 \cdot f) \quad \cdots (5)$$

其中, L_s 单位为 H, R_0 为 Ω , f 为 Hz。

测试实例: $U_1 = 1.029V$, $U_2 = 1.03V$, $f = 5012Hz$, $R_0 = 815 \Omega$, 代入公式(5) 得

$$L_s = 815 / (6.28 \times 5012) = 815 / 31475 = 0.025H = 25mH$$

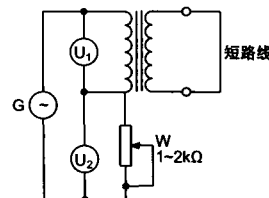


图 5 漏感测试电路二

3. 分布电容测量

利用谐振法测量的电路如图

表 1 测试结果比较

测试方法	TF6881A 测试仪				伏安法用图 2 电路		
测试条件	50Hz 1mA	1kHz 2mA	3kHz 2mA	5kHz 2mA	16.38V 2.1mA	33.1V 3.8mA	235V 26mA
电感量	21.6H	16.9H	12H	6.6H	24H	27.6H	29.5H

6所示。信号发生器通过一个30~50kΩ的电阻与标准电容C1和输出变压器一次侧组成的并联谐振电路构成弱耦合,然后调谐信号发生器的频率,数字表U1指示的电压为最大值这一点,就是电容C1和一次侧电感并联电路的谐振点。记下谐振点的频率,然后更换电容为C2,重复上述程序,利用式(6)进行计算。

$$C_0 = (f_2^2 C_2 - f_1^2 C_1) / (f_2^2 - f_1^2) \quad \dots (6)$$

其中, f 单位为 kHz, C 为 pF。

调谐信号发生器频率时需缓慢仔细调谐,因输出变压器由于采用硅钢片作铁心, Q 值很低,一般情况都在 10 以下,谐振曲线比较平缓,谐振点就不易准确找到。为了减少测量误差,电容 C 的选择应比输出变压器一次侧的分布电容大得多,精度在 0.5% 以上为好。根据经验,输出变压器的分布电容一般不会大于数千 pF,标准电容 C1 可以选择 0.05 μF 以下。

测试实例:一输出变压器电容用电容表实测 C2 为 14900pF, C1 为 24500pF, C2 与一次侧并联后,谐振频率 286Hz, C1 并联后谐振

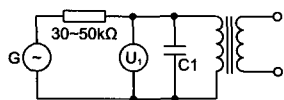


图 6 谐振法测量分布电容

频率为 222Hz,代入式(6)计算可得

$$C_0 = (f_2^2 C_2 - f_1^2 C_1) / (f_2^2 - f_1^2) = (0.286^2 \times 14900 - 0.222^2 \times 24500) / (0.286^2 - 0.222^2)$$

$$C_0 = (1218.7 - 1207) / 0.0325 = 11.7 / 0.0325 = 360 \text{ pF}$$

注意 C1、C2、f₁、f₂ 一定要测试准确,否则造成误差很大甚至不能计算的情况发生。

4. 直流电阻测量

用数字万用表的欧姆档直接测量,相同电感量的条件下,电阻低较好。特别注意推挽变压器两臂直流电阻误差最低标准 < 5%,高标准 < 1%。一般情况下一二次侧电阻 < 300 Ω 左右,二次侧电阻 < 0.5 Ω 左右为好。

5. 单端输出变压器及阻流圈气隙大小调整

目前个人能得到的铁心,无力作各种参数的综合测试,因此计算出的气隙大小只能作参考,必须通过调整才能得到最佳值。下面通过一只单端输出变压器气隙调整过程的比较,列出数据于表 2,从中可以看出调整的重要性,该变压器理论计算气隙为 0.27mm。调整过程列于表 2。通过表 2 数据比较,综合考虑气隙最佳值为 0.19mm。通过表 2 的数据分析可以看出气隙大小在单端输出变压器及阻流圈中的重要性。

表 2 气隙调整数据

气隙大小	电感量(无直流磁化)	加 50mA 直流电流
无气隙	100H	3.6H
0.12mm	34H	13.2H
0.16mm	22.87H	17.9H
0.19mm	20.9H	17.69H
0.22mm	19.42H	17.32H
0.27mm	17.6H	15.4H
	以上数据按图 2 方法测得	以上数据按图 3 方法测得

6. 频率响应的测试

频率响应通常是指输出下降 3dB 处所对应的两个频率之间的频率范围。这两个极限频率如下。

(1) 低频极限频率,在这个频率处,一次侧电感的感抗 X_L 值等于负载阻抗。

(2) 高频端极限频率,在这个频率处,泄漏电抗等于负载阻抗。

例如,对于一次侧负载为 6000 Ω 的变压器而言,低频达到 50Hz、高频 15000Hz,电感 L_x 必须 > 19H,漏抗 L_s < 63mH。

$$X_L = 2 \pi f L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 19 = 5966 \Omega$$

$$X_H = 2 \pi f L_s = 2 \times 3.14 \times 15000 \times 0.063 = 5934 \Omega$$

测试方法如图 7 所示。在一次侧输入不同频率的信号(在设计频段内,均匀多选几个点),从 R 两端测出不同频率的电压值 U,然后根据式(7)以 1000Hz 的电压值为基准,计算出输出变压器的不均匀度(单位为 dB)。

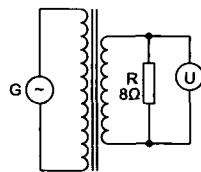


图 7 频响测试电路

不均匀度 = 20lg(某频率的电压值 U / 1000Hz 时的电压值)

... (7)

现在我们有了以上的方法,就可以利用手边的通用仪器对自制和邮购的各类变压器及扼流圈进行准确的测试,以测试数据为准,避免了盲目性,取得事半功倍的效果。