

电感耦合雪崩型分频器与它的DIY音箱

□ 刘 铁

两分频二阶 12dB/oct 滚降是音箱分频器的基本型式。众多的音箱都采用这种方式分音，特别是音箱的低通一路。见图 1。Ld 是低通线圈，Cd 是高通电容，YD 是负载扬声器，Vo 为音频电压源。当 YD 视为纯电阻时，这个电路的

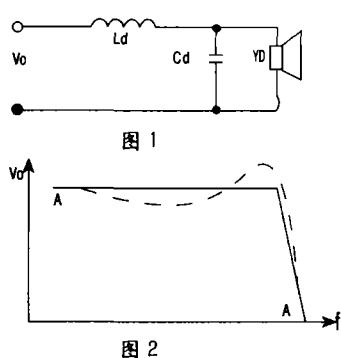


图 1

截止频率 $f_d = R / \sqrt{2} \pi Ld$ ，同时 Cds 要满足以下条件， $Cd = 1 / \sqrt{2} 2\pi f_d R$ ，它的频率响应在 f_d 以后以 12dB 倍频程下降。理想特性见图 2。由于电感与电容是个储能元件，实际上在 f_d 附近，折线并非理想状况。电路的实际频响状况依 Ld、Cd 与负载 (R 或 YD)，不同的品质因数，会有很高的隆起现象，电路谐振时 Cd 两端的电压，Ucd 竟然高于输出电压 Voo。根据能量守恒定律这频率点的电压提高时，附近频率点的电压必然降低，形成凹凸的峰谷现象。见图 2 虚线部分。

在分频器的低通电路中， f_d 附近的隆起状态当需尽量避免（在高通电路中情况类似，其原理相同不作讨论）。通常 Cd 并不按设计取值，当 Cd 减小至零时 f_d 式中的 $\sqrt{2}$ 值变为 $2\sqrt{2}$ ，情况相当于一阶网络。聪明的设计师通常降低 Cd 值，此时 f_d 式中的 $\sqrt{2}$ 值在 2 至 $2\sqrt{2}$ 之间变动。 f_d 值随之下移，频响曲线向右倾斜，坡度变缓，隆起现象随之减少。当然也有些音箱干脆采用 6dB/oct 滚降的一阶分频器，以减少 f_d 附近的频响隆起现象，不过需要有喇叭单元特性的配合。能满足采用一阶分频器的中低单元不多。但是必须指出：一阶分频也有隆起现象，减少隆起也要电路配合。

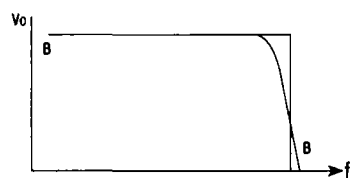


图 3

至此我们理出分频器低通一路的设计要点是：尽量地增宽低通频带、尽量地增加通带外的衰减，而在频率转折点 f_d 附近尽量少隆起现象（即相位特性要好），适当地和中低单元的频率本身并不均匀的特性相配合。理想状态见图 3，实际我们难以做到图中 A 曲线，只要做到 B 曲线就足矣！

这就是所谓的高斜率雪崩型曲线。

为什么要强调将低通滤波下降曲线做到尽量直呢？我们先做个实验：用雨果发烧金碟（一）CD 唱片做信号源，它录有各种频率的单点正弦波信号。接好放音系统（只要一路即可，另一路不接信号线）。断开

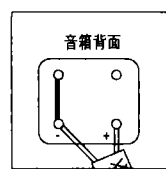


图 4

音箱接线盒的高低音喇叭连接铜片的正极那片。音箱线负极接音箱负极，音箱线正极接音箱接线盒下端的正极，见图 4。先放一段 1kHz 音频信号，在唱片中第 32 段，播放时间是 10 秒，将 CD 机置反复播放状态，以便连续放音。这时中低喇叭发出 1kHz 声响，高音喇叭无声。调节功放音量尽量小些，能听见就行，以利分辨音质。然后蹲坐在音箱旁边，手持原来断开的那片连接片搭上（连接高音）/ 放开（断开高音），你会发现搭上前声音会比断开时干些，声音收缩些。从 32 段（1kHz）开始到 38 段（4kHz）止，依每种音箱的情况不同，搭上前会有干、收缩，或更强声、更硬声等的感觉。这就是两个单元在同时发声时，互相干扰发生的结果。频率低时 2kHz 以下是高音单元那边的低频滤除不净干扰中低单元发声纯度。而 2kHz 以上频率是由于低通一路高频滤除不净造成中低单元发出高音而影响了高音单元的发声纯度所致。实验注意：35 段以上频率时，喇叭线要常接到中低一路接线柱。试听 35 段以上频率时，喇叭线要常接到高音那路接线柱上。许多音箱当试听 38 段至 42 段频率时（注意喇叭线常接到高音那路），连接中低那路时，会发现原来高音单元细致的声音被中低单元发出的声响所影响，使声音没有那么细腻，声音变散，方向感没有了，声音变粗、硬。中低单元发出的那么一丁点儿高音也会破坏高音单元的放声质量。因为它们经过分频器内的电感电容等元件时相位发生了变化，也即是它们并非同相。这种恶果在频响曲线和落水图中并不显著表现出来，而人们灵敏的耳朵这时却比仪器更能感受到这类失真。人们评价声音好坏就是议论这些。许多人苦苦追求的中高音细腻、柔和、清晰的目标症结就在这里。

再把信号放在 30 段（800Hz）时，甚至 29 段这些中频段，高音干扰中低单元的现象还是存在，搭上高音时，中低音单元发出的圆润的声音却被拉干了些。这里是人声的



主要频段,女高音与人声的情感声成分就在这个频段,钢琴的A音也在这个频段,这时如果高音干扰中低音单元发声,又何来Hi-Fi?做完这个实验后,我们可能对这样的音箱分频器感到失望。实际上不论是6dB或12dB倍频程滚降只是电子元件的一种本身固有的特性。在喇叭单元本身频响不能在放音频带上端(对于中低音单元)或放音频带下端(对于高音单元),较为齐刷刷地一刀切除的时候,把电感与电容配合来作高通或低通滤波实属是拉郎配的现象。幸好不少喇叭制造厂针对分频电路的不足之处,大大改进了单元在频响范围边界的特性,再配合传统分频器才终于有好的音箱出现,不过这些音箱价格很贵。而市场上绝大多数的喇叭单元并没有考虑要配合分频器的工作,用这些单元去配合传统分频器做成的音箱声音肯定不好。

我们有许多朋友都或多或少地怀疑过自己音箱里的喇叭单元质量是否好。特别是不满意现有音箱声音的,实际上不管你的喇叭单元是怎样的质量,现有的分频器都大大的折扣了现有喇叭单元的表现。换句话说:你现有的单元,不应只有现在的表现,这句话可以覆盖绝大多数万把元以下的音箱范围!我们指出:分频器是指挥、控制喇叭单元发声表现的重要部件,也是连接功放与喇叭之间互通的桥梁(指从功放到喇叭,从喇叭到功放),地位非常重要。经常出现的情况是:

1、设计好一个分频器比换一台高一级的功放或CD机等硬件设备要好得多(它主要表现在音质方面,而不是在音量方面)。

2、设计好的分频器做成的音箱完全可以胜于设计得一般的采用高一级喇叭单元的音箱。

常用传统分频器的弊病——通带内频响不均匀

本文只分析低通一路(高通那路道理相同故略去)。二阶两分频低通一路(见图1)的信号源是功放的输出端。对于功放来说,这个Ld与Cd相当于串联谐振。串联谐振的特点是:谐振点 f_0 时阻抗最低,电流最大。Ld实际采用空心线圈或带铁心线圈,不少发烧友为追求线圈直流电阻要小,采用Q值较高的大型线圈,结果使 f_0 点阻抗降低Q倍,使谐振现象更强烈, f_0 点处峰值更高,声音虽更出得来,但是同时使人声中频一段过于突出,声音失去自然感,这种极低的阻抗破坏了功放的开环特性,对于绝大多数以射极输出器形式的晶体管功放,音质破坏力更甚。以致发生某某音箱要配某某功放之说,这都是音箱分频器设计不完善而造成的。音箱输入特性应是有较为宽松条件的接口,无论什么

功放推动都不至于影响功放的工作状态。有着强烈谐振特性的音箱输入端口,不算是完美的设计,因为你并不知道这音箱将来要配什么功放。

功放与喇叭是互动的两个方面,一方面功放供给喇叭电流信号,另一方面喇叭放音振动时,音圈在磁场中运动产生反电势回馈给功放。从喇叭向功放看去,假定功放输出是电压源,电阻足够小(这在功放里是成立的)。Ld、Cd形成并联谐振,并联谐振 f_0 处对于喇叭来说分频器有相当高的阻抗,这对于喇叭在这 f_0 频率处附近的通路不利,阻尼变差,使中频段较为混浊,解析力大降,要想降低并联谐振电路的等效电阻,就须降低它的Q值,破坏它的谐振特性。破坏它某一支路的质量是非常必要的,不少发烧友使用不同的电容有意无意地破坏了并联谐振的Q值,而获得好一些的音质的例子大量存在。也有的在Cd支路上并联一些网络来破坏谐振现象。

传统的两分频二阶分频器低通一路在截止前必有一峰值输出,而这个峰值以下的频率也必有一个谷点下凹(见图2),引起中频不饱满,人声收缩,声音干、尖。

常见传统二阶分频器的弊病 ——通带难于拓宽、抬高

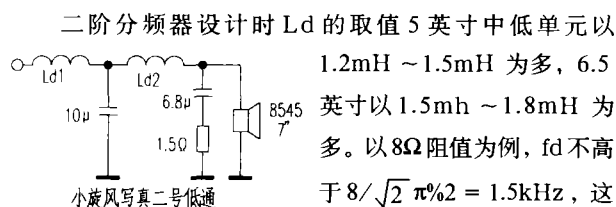


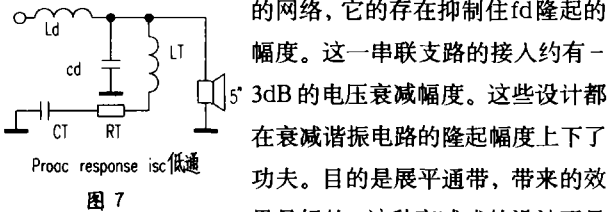
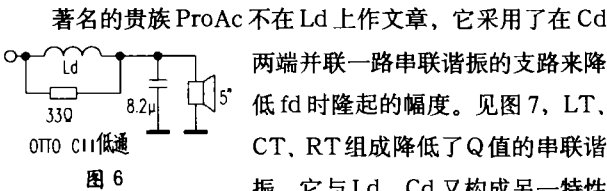
图5

二阶分频器设计时Ld的取值5英寸中低单元以1.2mH~1.5mH为多,6.5英寸以1.5mH~1.8mH为多。以 8Ω 阻值为例, f_d 不高 $8/\sqrt{2}\pi\%2=1.5\text{kHz}$,这样中低单元的低通特性不能抬高,欲想降低Ld电感量时又受到有限值倍频程滚降特性的制约,高音太多。通带外衰减不够,声音不细腻,如此矛盾重重。实用上以上数值虽经万般推敲仍无计可施。也有人用两节线圈组成Ld以18dB/oct滚降,以衰减通带外高频。例如小旋风写真二号的低通一路采用了这样的电路(见图5)。这种电路阻尼非常差,用手轻轻地敲击中低音单元振盆时听见箱内声响如鼓,手指弹击后声音依然回荡在箱内。人声缩在箱内唱歌,中频因被Ld隔阻两次而丧失殆尽,又因Cd取值很大,使振盆低频惯性增加,低音收不住,放音时低音轰鸣。

传统的二阶低通一路,Ld常采用1.2mH~1.8mH的数值,Cd常用在 $4.7\mu\text{F}$ 左右。这个电路谐振点刚好落在人声主要频段范围,有时为了滤除高频,不得不采用大容量的Cd值。例如惠威的M1.2音箱,Ld值约在1.6mH,Cd值

为11.8 μF 串联2.7 Ω 以降低Q值, 这样造成频响在这段 ($f_0 \approx 1.2\text{kHz}$) 增高, 人声变得突出, 特别是单个人声, 而当播放合唱时或重唱时, 人声层次变得混乱, 有些声音过于突出, 有些声音过于隐蔽, 童声合唱时更是响成一团, 不少音箱都有这种通病, 当播放一些简单声音信号时, 似乎比较通透 (有不少人是这样误解的), 层次表现力差是国产音箱的通病。

为了减少Ld与Cd谐振时的影响, 不少设计者作出了不同的尝试。例如加拿大奥图(OTTO)采用了在Ld两端并联一个33 Ω 电阻来降低谐振频率点的Q值, 以降低fd隆起的幅度, 它使中频段更加顺畅和厚实, 但这种简单的作法同时带来了高频过多进入中低单元以致使人声变粗, 见图6。



常用二阶分频器的弊病——通带外衰减不足

传统二阶分频低通一路接上扬声器时, 通带外衰减不够大, 当输入频率在5kHz~10kHz时, 中低音单元还有声音输出, 这种相位移很大的、声响微小的声音信号与高音单元发出的声音形成混乱的抵消或加强状态, 从而影响高音的声音质量。

我们来看这方面设计得非常好的法国JM Lab DB26K2音箱, 它采用了他们自产的FOCAL7K001防弹布单元。断开高音单元, 只用中低一路放音, 5kHz以后中低单元几近无声, 8kHz~10kHz时, 更是难以听见中低单元发出声响。3.5kHz时中低单元发出清晰的声响, 可见它有非常好的矩形特性。接上高音时, 高音几乎全在高频单元发出, 两只单元干扰非常小。难怪它的音箱是驰名的一线产品。顺手拿来惠威的M1.2音箱里的F6中低单元断开高音单元, 当中低单元输入5kHz以上频率时, 直到10kHz喇叭还是有不小的声响。测试和实听都证实, 绝大多数设计不良的音箱都存在这个问题。值得一提的是: 不少中低音单元, 特别是国产的中低单元, 把应是只有中低频响特性做成了近乎全频带单元, 5kHz以上的频响, 特别是5kHz~8kHz这段衰减不够大。(这段响应在大口径中低单元上是无用的, 这时它的盆裂失真很大, 指向性也不好。)以致使分频器无力来完成这一额外的负担。这种单元实际上并不适合两分频音箱用。作为中低单元在5kHz频率附近以内最好有平坦的响应, 5kHz附近以上必须有足够的响应衰减, 这样才可使与高音单元放音重合时各司其职、互不干扰、细腻好听。如以中低单元3kHz的响应为基准, 5kHz时频率响应衰减要达到-3dB的功率衰减量, 8kHz时要达到-9dB左右。这两条标准结合起来, 就意味着中低单元的高端频率响应最好要有一定的倾斜度, 即斜率要高。这里列举出一些国内外中低单元的以3kHz为基准(0dB), 8kHz时频响衰减量, 以供参考, 见表一。

表一

产地品牌	规格型号	3kHz基准8kHz衰减
西德ETON	7英寸7-360/37HEX	-9dB
挪威SEAS	6.5英寸H548	-8dB
挪威SEAS	5英寸H775	>-9dB
国产惠威	SS6.5	-10dB
国产惠威	S8-PIVS	<-2dB

目前, 单只扬声器无法满足全音频频带的放音频响要求, 而无奈地使用两分频以上的结构。对于高音单元这一路几乎都能做到满足两分频的要求。只要把它的振膜做得足够小, 且有很高的机械阻尼就可以, 在高频单元的 f_0 低以获得很高斜率的频响带外衰减, 这当然是基本要求。而对于中低单元既要承受低频大功率、大动态, 要有高顺性的要求, 又要在中低频有良好的响应, 还要在频带高端有快速截止的响应, 要做到这样的矩形特性实在难矣! 难怪我们总

是那么在乎中低音单元的特性。例如著名的FOCAL 7K011 7英寸三文治防弹布单元就是这样的特性,它发表的频响在4kHz至100Hz非常平直,4kHz以上时快带速截止。3kHz时靠近跟前实听,感觉整个振盆都在发声,证明它的振盆分裂现象十分低,是一款十分优秀的中低音单元。目前少有能听到有如此感觉的中低音单元,不少中低音单元3kHz发声时感觉到它是在振盆中央的边缘发声,整个振盆并未参与振动,发声尖细,没有能量感。3kHz这个频率多是两分频音箱内高低两个单元工作的相交点,在这个点上相频特性没有相交好,会严重影响放音的亲切感。欣闻国内博良也有一款BL601中低音单元,4kHz时下降了3dB,6kHz时达-23dB,矩形特性非常好。这种单元甚至可以革除分频器的低通部分。但不足之处是10kHz附近衰减仅-20dB还嫌不足,如果革除分频器,带来其他好处之时估计会带来声音不够细腻的毛病。不过这说明了有些扬声器生产厂已注意到这个问题了。

新型电感耦合分频器

对于两分频音箱,如果中低音单元在通带外8kHz时有约10dB的衰减量,再加上传统12dB/oct分频器这时还可提供约有6dB的衰减贡献,这两项加起来相对于3kHz时8kHz有16dB的功率衰减量,算是达到了实用的要求范围。在不少高级音箱里还是达到了此要求。如果此时能提高矩形系数,减弱中低音单元在8kHz附近时的残余声功率,减少它对高音单元的干扰,则使声音更加纯净、清晰、自然。这在单元里实在是难以做到了。我们把希望寄予分频电路上。若能

在此有所突破,将可用中级的中低音单元向较高级别的中低音单元挑战,并超过它,这里主要指两单元干扰指标超过它(并非全部指标)。但这是一个显著影响听音的指标。所以两分频音箱的中低音单元应有较好的矩形特性,并在通带内频响均匀,通带外衰减足够,转折时自然与突变有机结合(失真度与其他非频响参数不在此讨论范围)。如果条件不满足或不够的话则应由分频器的矩形特性给予补偿或增强(使用一阶分频的单元与分频器的音箱不在此讨论范围)。顺着这一思路,我们创造性地利用电感的特性,通过耦合线圈大大提高了8kHz附近频率的衰减量,这样作又不至于降低通带内的传输特性。这样一来,在保证低通衰减特性的情况下,Ld值可得以减少,Cd值也可大幅减少。在Ld减小,Cd值减小时,8kHz附近的功率衰减量还比传统两分频电路要

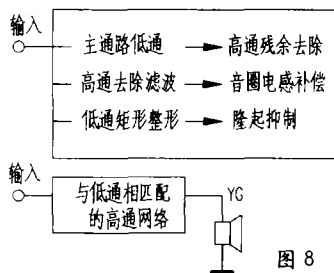


图 8

优约5dB数值。我们利用多个线圈的耦合,通过L与C、L与L的电路谐振或失谐时是阻性或呈容性或呈感性的各种状态,巧妙地构

成了平直通带的高斜率、并且相频特性好的带通滤波器(原理见图8)。我们还是觉得使用电感做低通线圈比较合理,它可以通过设计值去补偿中低音单元本身的各种频响倾向,以调出些适合各种声音倾向的品味。这种新型分频器的效率高,中频少受影响,解决了声音润泽与解析力这对矛盾。用它制成的音箱大大超越使用同样单元音箱的放音水平,提高的程度比起换Cd、换功放、换音箱要好得多。

