

超大电流双极晶体管的魅力(下)

MOTO
名管
MJ11032
/33
与改进型平衡功率放大器的制作

黄炳全 黄绍维

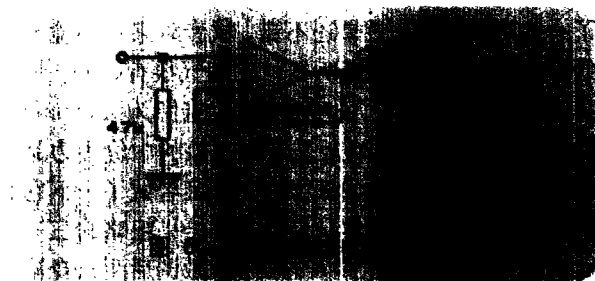
(3) 同极性复合管输出级

由于Q5、Q6和Q11、Q12分别提供相同幅度、不同相位的输出信号，因此输出级就以两组同极性复合管串联而成(注意：图2中Q8、Q14漏极接地是迫使其工作于共漏极组态，从而与上臂输出管的状态更一致)。关于同极性与异极性管输出级孰优孰劣，在这里笔者不想过多地评论，不过就实际的测试与使用经验而言，在一定的条件下(例如0.1~5A电流范围内)，同极性管与异极性配对管的特性曲线很接近；而在极限条件下(例如电流>10A以上)则总是同极性复合管的一致性要好一些。但由于本文前面介绍的MJ11032/33对管的线性电流达±20A以上，故采用何种复合形式的输出级主导权在于读者个人喜好。况且再因图2功放激励级对输出管的驱动是通过R7~R10的电流变化(因而电压也变化)造成的，这与普通功放的单纯电压激励不同，故实测图2功放的输出级设计更有利于(热敏感型晶体管)MJ11032工作点热稳定性的实现。

(4) 制作要点与性能

读者若制作图2功放，以下几点是必须注意的：①第一差动级从任何角度考虑都是颇为重要的，故Q1、Q2应严格配对(包括 V_{GS} 、 g_m 和 C_{is} 等均应控制在1%误差以内)；②该功放各级之间必须看作具有高阻抗隔离的单元电路来设计，这其中第一级使用FET主要是使功放直流化，第二级Q5、Q6及Q11、Q12绝不能用双极晶体管代替，原因是双极晶体管与MOS管相比，前者的低输入阻抗和基极电流会令图2功放的两个输出端出现很高的直流电压，使整机

无法正常工作！这点是必须牢记的；③推动管与输出各晶体管装在同一散热器上并使Q4与其中一个输出管作热耦合；④R11用以调整输入级电流，R12、R13则决定输出级的静态电流，与R2串联的接地电阻 R^* 可以保证功放正反相的增益一致，其值约为50~600Ω(功放正反相放大的平衡最好用测试碟、音频电压表、示波器等监测输出波形并仔细调整 R^* 加以确认，如若不能则可以在功放输入端增加一级低阻抗输出电路，从而保证较小的增益误差，如图6所示)。



事实上由于电路结构的原因，图2功放在元件配对良好的情况下，输出端也会出现约2~3V的失调电压。不过对于BTL电路而言这个直流电压不会出现在扬声器两极，也不至于影响到功放的平衡状态。笔者用现有条件测得本机的部分性能如下(600VA电源，4Ω负载)：输出噪声电压0.32mV(输入短路)，频率响应20Hz~100kHz(-1dB)，最大输出功率266W(4Ω)。

2. 注重电源与信号隔离设计的全平衡后级

本文的第一节介绍了MJ11032/33互补复合管，而接下来图2的功放采用的是单端输入、同极性晶体管输出设计，这对于现时Hi-End界普遍采用平衡输入和互补对称输出级的趋势来说似乎有点背道而驰。下面的这款功放是在传统桥式功放优点的基础上着重电源与信号的隔离设计，以求获得纯正的传输和更多细节表现力为前提的大功率全平衡后级放大器。

(1) 从市电被污染说起

前些日子邻居家搞装修，白天里电动工具忙个不停。噪声干扰且不说，上述大功率用电器具频繁启动产生的电网电压波动和电火花污染所造成的危害让笔者有了切实的感受。为对抗各种用电器具并存对电网造成的污染，要求高的发烧友从市场上买回各种无源、有源滤波器用于改善他们心爱的影音器材的供电质量。不过也应看到，有诸多的因素限制着这些电源

滤波器的性能发挥或普及程度。以下试举其中一二予以说明：①普通的无源滤波器由于其构成元件中含有电感器、旁路电容等，要使它正常发挥效能应具备可靠的接地条件（指大地）。据笔者所知大部分普通家庭均没有足够低电阻的接地线，故不能将市电中的杂波有效旁路，此其一；况且无源滤波器若用在后级放大器供电侧，当中的电感还有影响功放瞬态响应之嫌——这不能不令人有所顾忌。②高档次的有源滤波器如 Accuphase PS 系列，虽然性能不俗，但以其相当于一台顶级功放的售价——倘若把一台 PS1200V 电源滤波器和一台 E407 功放置于你面前让阁下二取其一的话，想必你会选择后者而舍却前者吧？看来，对于大部分工薪族发烧友来说，要帮他们的器材对抗电网干扰只有另辟蹊径；而对 Diyer 来说，能够设法提高放大器自身的滤波能力的确实实用又实惠。

（2）功放电源与信号的隔离技术

说到隔离技术，实际上本文的主题——平衡输出功率放大器本身其输出信号就是浮地的，只不过就隔离程度而言，图 2 功放做得还不够“彻底”而已。再看我们下面要介绍的功放（如图 7 所示），该功放由完全相同的两部分完成正反相放大，因此仅以正半周信号通道作分析。信号从输入端 +Input → A、A' 点 → B、B' 点，然后一直到输出端 +Output，整个传输、放大过程都通过有源器件与电源隔离，从而实现音频信号的浮地（浮电源）传送放大。

为便于理解，这里单独对图 7 中的点 A、A' 如何与电源隔离作详细说明。输入信号经差分管 T1、T2 放大后由各自的漏极输出到达 A、A' 点，而 T15、T16 是两个独立的恒流源，它们本身具有的极高交流阻抗把来自正电源线的干扰杜绝。关于以上结论，我们还可以从图 8 的 G15、G16 和图 2 中的 R5、R6 与电源的连接情况与图 7 加以比较说明：图 8 中 G15、G16 组成输入级 G1、G2 的镜像负载，而 G16 可等效为一个二极管，其作用只是平衡 G1、G2 的电流而不是体现高阻抗隔离特性；至于图 2 中的 R5、R6，很显然它们不管在交、直流条件下内阻都不会变化，因此电源线上的纹波就毫无困难地与 R5、R6 上的音频电压叠加，从而造成污染。有了以上分析，读者便不难体会图 7 功放的设计思想了。

（3）差动放大器的“终极”应用电路

笔者一直坚持以简洁的特色电路制作功放。就拿图 2、图 7 两款功放来说，两者电路看似相近，其实

各具特色。再看图 7 电路的第二点与别人不同之处（仍然结合图 8 分析），图 8 是广泛应用的共源共基差动输入放大电路，其中 G1、G2 作共源放大，G5、G6 组成共基极结构用以改善前者的高频线性，它们共同完成第一级电压放大任务（图 8 中 G5 的 C 极通常还接有后续的 G18 完成第二级主电压放大）。我们再看图 7 中的 T5、T6 与 T1、T2，虽说同为共源共基级联结构，但图 7 利用共基极电路的低输入阻抗特性把 T5、T6 与 T1、T2 紧密级联，同时在其转折点（A、A'）巧妙地插入恒流管 T15、T16，既为上述电路提供驱动电流、实现信号与电源之间的良好隔离，同时也因 PNP 型共基极级联管 T5、T6 的作用使 T1、T2 的输出信号电流方向得以转移，并由 T5、T6 及 T8 把差动放大转为单端输出（B、B' 点），于是可以直接激励后面 T11、T12 组成的推挽输出级。

由图 8 与图 7 的对比分析可知，后者以相同的元件数目仅用一级放大即成功将输入级与激励级合并（图 8 的第二级主电压放大管 G18 在图 7 中根本不必出现），而且是抗干扰的、高频特性优良的线性放大。综上所述，再结合笔者以往接触过的各种线性差动放大技术（诸如全对称互补差动电路、菱形差动电路及钻石差动电路等），单从电路的简洁且高性能而论，图 7 的输入/激励级合并结构给人以“差动放大器终极应用电路”的感觉。

（4）共基极电路与恒流源的广泛应用

众所周知，共基极高频放大电路原本用于射频、视频领域，特点是高频线性优良；而恒流源顾名思义除可为负载提供恒定电流、稳定电路的工作点外，其高动态交流阻抗对电源纹波的抑制作用也不容忽视。

①图 7 功放中 T5~T8 均为共基极电路组态，其中 T5、T6 将差动级 T1、T2 的信号电流转移方向并直驱输出级；T7 基极接地可令上述两共基管（T5、T6）左右两臂被“强制”工作于平衡状态；T8 则保证了输出级上下两臂的正、负激励幅度相等；T5~T8 共同为图 7 功放提供平坦的高频延伸，因此应使用线性优良的视频管。

②图 7 功放各路恒流源的“分工”如下：T3、T4 组成场效应差分 T1、T2 的电流通道并由 R11 调定为设计值（28mA）；T9、T10 组成镜流电路以平衡 T5、T6 的电流；T15、T16 则决定上述两者的总工作电流。而 T17 和 T3、T4 的复合恒流结构进一步保证了 D1~D3 基准电压的稳定性（同时也保证了整个电压

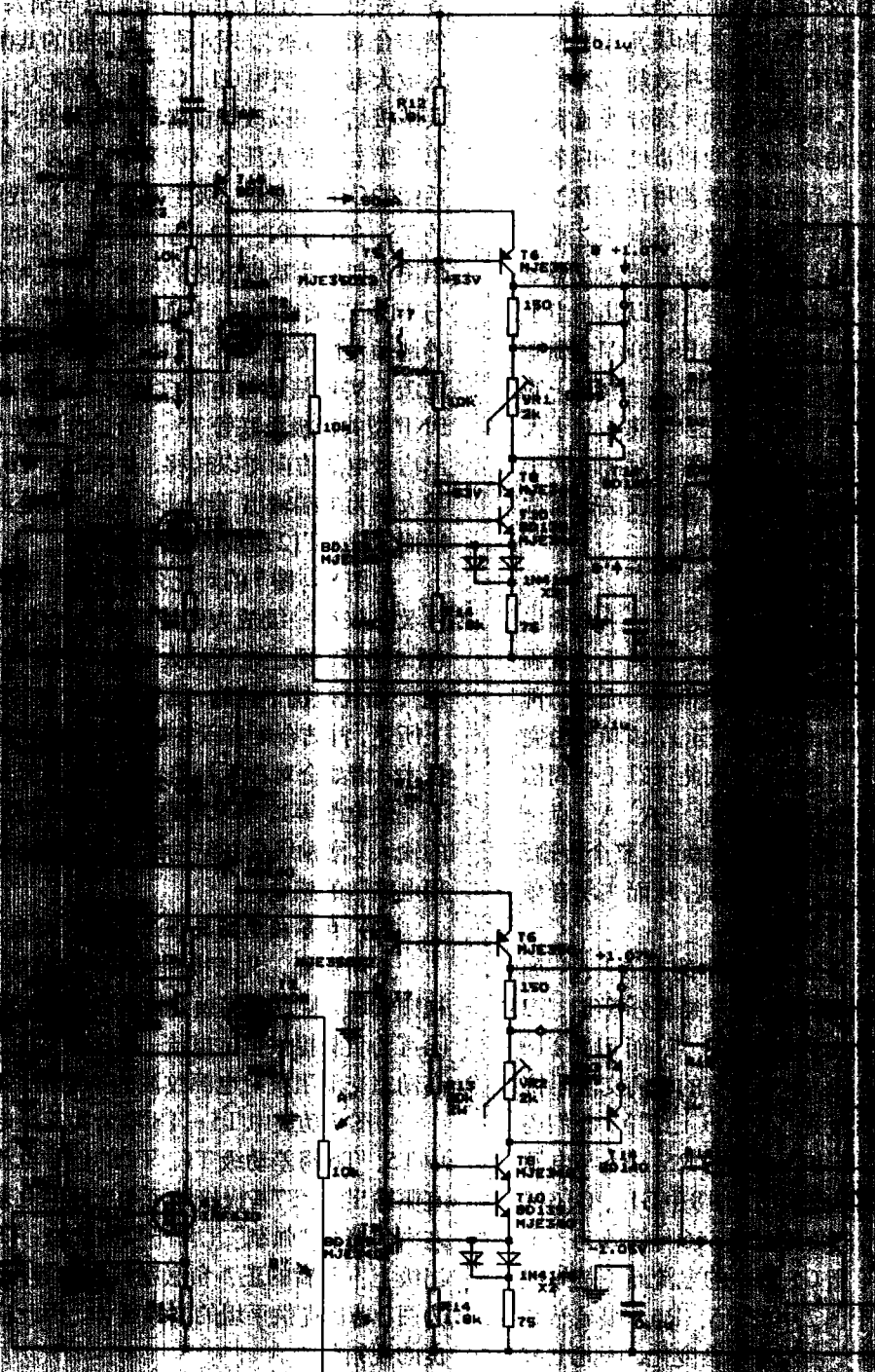
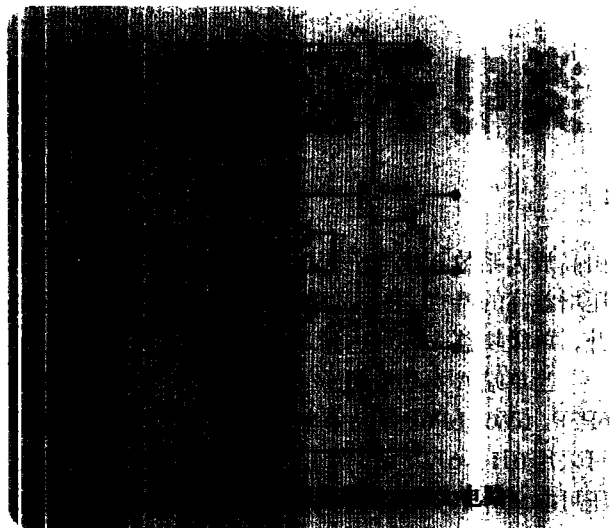


图 1 信号浮地的功率放大器

级工作点) 不受电源波动的影响。有了上述稳定性的设计, 故只需通过 R12~R14 将 T5、T6、T8 的工作电压钳位于一定比例上, 就可确保电压级有足够的激励幅度和恒流管 (T10、T15、T16) 有合理的压降以

抑制电源纹波干扰。

图 7 功放的其他特性是输出级由 T11、T12 互补复合管“把关”, 并由 T13、T14 组成接近理想的恒流/恒压偏置电路以稳定其工作点。由于图 7 功放的整体

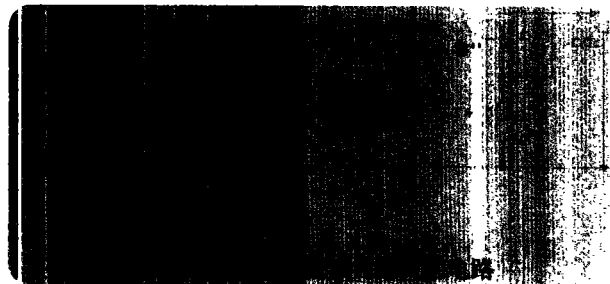


开环增益主要由T6的负载(即T11、T12的输入阻抗)与差动级MOS管T1、T2的 g_m 共同决定的,因此在选管时应注意T1、T2跨导不能太低(例如K373之类JFET就不合适)以免造成增益不足或失真加大;另外,要有足够的激励幅度,T5、T6工作电流的取值应比T1、T2大得多。也正因如此,输出级T11、T12的B、E极可以分别接入分流电阻R15、R16,一方面可减少电流级的输入阻抗变化范围以改善开环指标;另一方面对增强输出管的热稳定性大有好处。

(5) 制作、测评与使用、改进心得

图7功放中差动放大级T1、T2的配对误差造成的输出中点偏移情况见表2,读者选管时对比表2自然心中有数(若T1、T2一致性不保证,可将功放改为交流放大电路,详见图9所示)。要充分体现功放的电源/信号良好的隔离特性,图7功放电压级电源取值应比末级高 $\pm 15V$ 以上——其中一方面满足激励幅值,另一方面则保持T10和T15、T16的正常工作条件。

最后不得不重复输出管MJ11032/33的散热设计与热补偿安排:制作中笔者选用的散热器是工业用的进口拆机品,其基板厚约6mm,因为已钻有TO-3金



封管的安装孔所以使用方便。整个散热器重达8kg,最引人注目的是其背靠背的两块散热器翼片之间形成一个空气管道,两侧出风口均装有鼓风、抽风的散热风扇等。该散热器在风扇不启动时功耗大约达250W,强制冷却下的散热能量可超过1kW。因此用于图7的大功率输出级晶体管安装是十分合适的,不过还应注意输出管的绝缘材料如果使用的是普通市售云母片,则最好用刀片把每片云母片小心分成薄薄的两片以求获得最低的热阻。通过上述措施,功放管的散热条件可保证在 $0.5^{\circ}C/W$ 以下,这对于甲乙类功放已足够。另外,制作中T13、T14必须贴压于T11、T12的管壳上以将热补偿响应时间缩至最短(尽管如此,实测图7功放管的静态电流在大动态下仍会比设定值高50%左右,但对整机影响不大。若制作者要求输出管偏流有接近零的温度系数,请参照图2给T11、T12增加MOS驱动管如K214/J77等)。

实测图7功放静态时的噪声输出电压最大值为 $0.45mV$,与图2相比似乎并无改善。但实际上从该功放在输入端悬空(不计权)、或输入接地、或在使用稳压与非稳压电源时的输出噪声电压均 $< 0.5mV$ 来看,本功放的电源、信号隔离设计是行之有效的(实测输出噪声电压较大主要来源是本地电压级工作电流,换言之是器件的噪声,况且几mV以内的噪声人耳实难察觉)。再从图7功放的实际放音效果判断:音乐细节的表现力,声音的凝聚力和 $350W/8\Omega$ 、 $500W/4\Omega$ 的庞大功率储备实不愧对其“高保真大功率”的评价!

图7电路除设计颇具特色之外,制作中还主要选用了欧美型号的晶体管(T1、T2除外),声音取向是厚实、清晰,应能适合更多发烧友的听音要求。出于实现隔离技术与平衡传输的初衷,图7功放采用的是大功率的桥接输出方式以保证放音动态使其远离“削波”的硬失真之忧。当然制作者可把它作为立体声功放使用,这时只要在+Input、-Input端子分别输入不同声道信号,而+Output、-Output端分别经扬声器接地即可。

对于喜欢不断尝试的发烧友,还可以把图7功放改为电压/电流负反馈混合形式(结构可参考Marantz HDAM电路)。关于这点,笔者的实践结果并不理想。可能是因为增加电流负反馈部分后整机的开环增益过高,要加入补偿电容以保证其工作稳定,这样反而使声音失去活力。