文章编号:1002-8684(2008)12-0033-03

基于电子管 SRPP 电路的 高保真耳机放大器设计

·产品设计,

周静雷¹. 王 璠¹. 康雪娟²

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安航空技术高等专科学校 电气系, 陕西 西安 710077)

【摘 要】以电子管微变等效电路分析为基础,设计了一款以驱动高保真耳机为目的的耳机放大器。该放大器以共 阴极放大器为输入级,SRPP 放大器为输出级,驱动耳机工作。分析了该放大器的开环和闭环参数,并采用客观测量 和主观评价的方式对该放大器的品质进行评价。

【关键词】并联调整推挽电路; 耳机放大器; 电子管; 微变等效

【中图分类号】TN72

【文献标识码】A

Design on High-Fidelity Headphone Amplifier Based on Vacuum Tube SRPP Circuit

ZHOU Jing-lei¹, WANG Pan¹, KANG Xue-juan²

- (1. Electronic Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
 - 2. Electrical Department, Xi'an Aerotechnical College, Xi'an 710048, China)

[Abstract] Based on the analysis of vacuum tube slight variation equivalent circuit, a headphone amplifier is designed to drive high fidelity headphone. The co-cathode amplifier is used as the input entry of the amplifier, and the SRPP(Shunt Regulated Push-Pull)amplifier is used as the output entry of the amplifier to drive the headphone. The open-loop and closed-loop parameters of the amplifier are analyzed, and the quality of the amplifier is estimated through impersonal measurement and subjective evaluations.

[Key words] SRPP; headphone amplifier; vacuum tube; slight variation equivalent

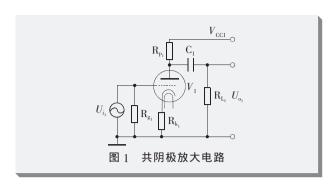
引言 1

在高保真音响电路中,电子管放大器由于其独特 的韵味和音乐听感,一直备受广大音响爱好者的喜爱 和关注。近年来,高保真耳机由于其使用的便捷性(体 积小,对环境要求简单)和相对较低的价格(相对于发 烧音箱),受到越来越多的音乐爱好者和音响发烧友的 青睐。在高保真耳机家族中,耳机阻抗从低阻、中阻到 高阻均有分布: 如爱科技的 271S 额定阻抗为 48Ω , 拜 亚动力的 Dt48 额定阻抗为 200 Ω , 森海尔的 HD580, HD600, HD650 额定阻抗为 300Ω 等。对于阻抗较高的 耳机,通常需要专门的配套电路,才能展现其优异的性 能。同用于音箱的扬声器单元相比,耳机对于它的驱动 电路性能指标的要求更加严格。与晶体管相比,电子管 静态工作点电压高、内阻大,更适合输出摆幅大、电流 小的驱动信号。这个特点使得电子管适用于驱动对品 质要求高,但功率要求低的高保真耳机。

在音频前置放大器中,并联调整推挽(Shunt Regulated Push-Pull, SRPP) 电路具有高增益、低失真、低 输出阻抗等特点,能够获得优异的音质表现,因而在 音响电路中广泛应用。笔者设计了一款以共阴极放大 器为输入级,SRPP 放大电路为输出级的耳机放大器电 路。对该电路建立了微变等效模型[1-3],选择合理的器 件,通过理论计算控制相应的参数,使放大器能够较 好地驱动耳机工作。

输入级

输入级采用一只电子管三极管构成的共阴极放大 电路,其电路原理图如图 1 所示。图中电阻 R_L , R_k 和 R。分别同电子管的阳极、阴极和栅极相连接,使电子 管建立稳定的工作点,同时具有合适的增益和适当的 局部负反馈。V,可选择常用的电子三极管,如单三极管 ECC92, 或者是双三极管 ECC82,12AU7,5814 等型号 中的一只。

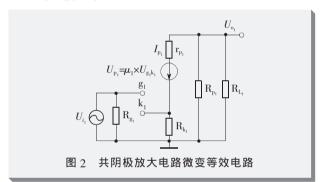


电子管三极管工作原理与晶体管中的双极性三极管不同,但和场效应管类似,属于电压型放大器件,其主要参数为跨导 $g_{_{\rm m}}$,内阻 $r_{_{\rm p}}$ 和放大系数 μ ,且三者之间满足

$$\mu = g_{\mathbf{m}} r_{\mathbf{p}} \tag{1}$$

该电路的微变等效电路如图 2 所示,这里将电子管看成是受控电压源。图中,输入电压可表示为

$$U_{i_1} = U_{g,k_1} + U_{k_1} \tag{2}$$



式(2)中 $U_{\rm g,k_i}$ 为电子管栅极和阴极两端的电压, $U_{\rm k_i}$ 为阴极电阻 $R_{\rm k}$ 两端的电压

$$U_{k_{i}} = \frac{\mu_{i} U_{g_{i}k_{i}} R_{k_{i}} (R_{p_{i}} + R_{L_{i}})}{(r_{p_{i}} + R_{k_{i}}) (R_{p_{i}} + R_{L_{i}}) + R_{p_{i}} R_{L_{i}}}$$
(3)

共阴极放大电路的输出电压为

$$U_{o_{i}} = \frac{\mu_{i} U_{g_{i}k_{i}} R_{p_{i}} R_{L_{i}}}{(r_{p_{i}} + R_{k_{i}}) (R_{p_{i}} + R_{L_{i}}) + R_{p_{i}} R_{L_{i}}}$$
(4)

电压放大倍数为

$$G_{V_{i}} = \frac{U_{o_{i}}}{U_{i_{i}}} = \frac{\mu_{1}R_{p_{i}}R_{L_{i}}}{\left[r_{p_{i}} + (\mu_{1} + 1)R_{k_{i}}\right]\left(R_{p_{i}} + R_{L_{i}}\right) + R_{p_{i}}R_{L_{i}}}$$
(5)

3 输出级

输出级采用 SRPP 电路, 电子管既可选择内阻合适的三极管,如 6N6,E182CC,也可选择用于功放的小功率五极管,如 6P15,6P14,EL42,EL91,EL84,EL86。一般五极管内阻较大,增益很高,为了降低输出阻抗和增益,需将五极管连接成三极管使用。

文中的输出级选用小功率五极管作为放大器件,选择其他型号的管子时,需要根据管子自身参数确定外围元件的参数和供电电压 V_{CC2} 。在图 3 中, R_{sg} 和 R_{sg} 。分别将五极管 V_2 和 V_3 的第二栅极和阳极相连接,因而成为三极管工作方式。 R_{k_1} 和 R_{k_2} 分别与 V_2 和 V_3 的阴极相连接,为电子管提供适当的栅负压。 R_{L_2} 表示负载的阻抗。选择不同型号的管子,由于内阻和增益的差别,在驱动耳机工作时,会有不同的声音表现,通常可通过主观音质评价来确定管子的选择。

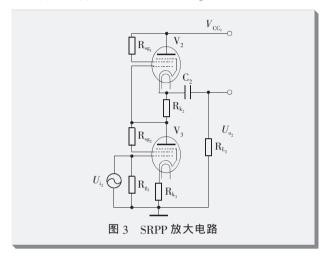
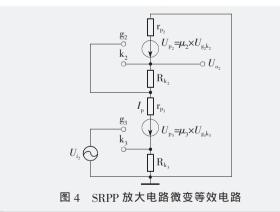


图 4 是图 3 的微变等效电路,图中/为

$$I_{p} = (\mu_{2} \times U_{g_{2}k_{2}} - U_{o_{2}})/r_{p_{2}} = \frac{U_{i_{2}} - U_{g_{3}k_{3}}}{R_{k_{3}}} = \frac{U_{g_{2}k_{2}}}{R_{k_{3}}}$$
(6)



输出电压 U。为

$$U_{o} = \mu_{o} U_{g,k} - I_{p} r_{p,k} \tag{7}$$

$$U_{o} = (R_{k} + R_{k} + r_{p}) I_{p} - \mu_{3} U_{g,k}$$
 (8)

将式(6)~(8)联立,经过简化可得出输出级的电压增益为

$$G_{V_{2}} = \frac{U_{o_{2}}}{U_{i_{2}}} = \frac{\mu_{3}(r_{p_{2}} + \mu_{2}R_{k_{2}})}{R_{k_{2}} + R_{k_{3}} + r_{p_{2}} + r_{p_{3}} + \mu_{2}R_{k_{2}} + \mu_{3}R_{k_{3}}}$$
(9)

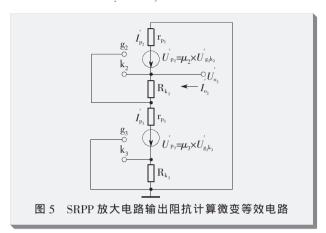
将图 5 所示的等效电路中的输入电压源短路,在

输出端施加一个电压 U_{0} ,这时从输出端向内看的电流 记作为 I_{α} ,可由式(10)~(12)计算得出

$$U_{o_{2}}^{'} = \frac{U_{g,k_{3}}^{'}}{R_{k_{1}}} (R_{k_{2}} + R_{k_{3}} + r_{p_{3}}) - \mu_{3} U_{g,k_{3}}^{'}$$
(10)

$$I_{o_{2}} = \frac{U_{o_{2}} + \mu_{3} U_{g_{3}k_{3}}}{R_{k_{1}} + R_{k_{1}} + r_{p_{1}}} + \frac{U_{o_{2}} - \mu_{2} U_{g_{3}k_{2}}}{r_{p_{1}}}$$
(11)

$$I_{p_3} = I_{o_2} + I_{p_2} = -\frac{U_{g_3 k_2}}{R_{k_3}} = -\frac{U_{g_3 k_3}}{R_{k_3}}$$
(12)



从式(11)~(13)可计算得到 SRPP 放大电路的输 出阻抗为

$$Z_{\text{out}_{2}} = \frac{r_{\text{p}_{2}}(\mu_{3}R_{\text{k}_{3}} + r_{\text{p}_{3}} + R_{\text{k}_{2}} + R_{\text{k}_{3}})}{r_{\text{p}_{2}} + r_{\text{p}_{3}} + R_{\text{k}_{2}} + R_{\text{k}_{3}} + \mu_{3}R_{\text{k}_{3}} + \mu_{2}R_{\text{k}_{2}}}$$
(13)

整体设计

整机的电路原理图和元器件的取值如图 6 所示。 输入级放大器件选用 Ecc82 双三极管,输出级选用 6P15,基本参数如表 1 所示[4]。为降低输出阻抗,以便于 和阻抗较低的耳机相匹配、输出级 SRPP 电路采用双 管并联的方式工作。放大器的相关参数计算方法如下 所示[5-6],其中开环电压增益为

$$G = G_1 \cdot G_2 \tag{14}$$

反馈系数为

$$H = \frac{R_3}{R_3 + R_f} + \frac{0.510}{0.510 + 10.0} = 0.0485$$
 (15)

闭环电压增益为

$$G_i = G/(1 + GH) \tag{16}$$

输出阻抗为

$$Z_{\text{outf}} = Z_{\text{out}} / (1 + GH) \tag{17}$$

负载电压增益为

$$G_{\rm I} = G_{\rm f} \cdot R_{\rm I} / (R_{\rm I} + Z_{\rm outf}) \tag{18}$$

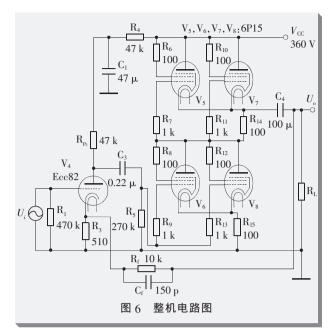


表 1 放大器件参数

管子型号	内阻 $r_{_{ m p}}/{ m k}\Omega$	放大系数 μ
Ecc82	7.20	18.00
6P15	1.51	18.30

表 2 耳机放大器理论计算参数

开环参数			整个系统闭环参数			
输入级	输出级				接负载	
电压增益	空载电 压增益	输出阻 抗/Ω	输出阻 抗/Ω	空载电 压增益	负载/Ω	电压 增益
-12.7	-8.82	393	61.2	17.6	48 200 300	7.65 13.30 14.50

客观测试及主观聆听

经过测试, 耳机放大器在驱动不同阻抗负载的情 况下, 电路中的各项参数如表 3 所示。从表 2~3 中可看 出,测量结果和理论计算结果比较接近。相对于一般的 晶体管耳机放大器,电子管放大器的输出阻抗略高,这 个阻抗会影响耳机单元的总Q值,以至于影响耳机的 瞬态特性[7],这也是电子管耳机放大器产生特有的听觉 效果的一个因素。

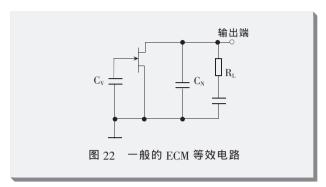
表 3 耳机放大器测量参数(1 kHz)

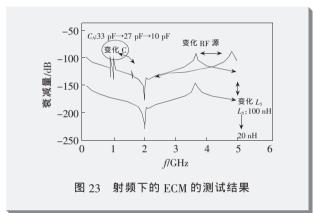
开环参数			整个系统闭环参数			
输入级	输出级				接负载	
电压增益	空载电 压增益	输出阻 抗/Ω	输出阻 抗/Ω	空载电 压增益	负载/Ω	电压 增益
-12.3	-8.98	432	77.1	17.0	48 200 300	6.79 12.80 13.80

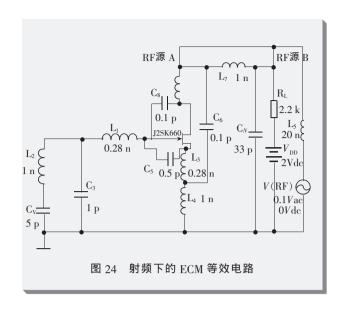
(下转第 42 页)

Electroacoustic Parts and Circuit

其原因不能一概而论,RF 的噪声基本上是从 $V_{\rm DD}$ 处通过 $C_{\rm iss}$ 进入到栅极,而对低频产生影响。因此,不能单用 ECM 等效电路,而应用 ECM 的 RF 等效电路。图 22~24 可得,线路板的参数 L,C 对 ECM 的低频信号(1 000 Hz 以下)影响小,而对 ECM 在 1~5 kHz 的信







号来说就有明显影响。因此,线路板的参数必须加以研究,配线长度和方式等也要加以注意。

以上是对 ECM 等效模型进行的初步分析讨论,整理出来供有兴趣的读者参考。

参考文献

- [1] 吴宗汉,王丽,李军. 驻极体与驻极体话筒[M]. 南京:东南大学出版社,2003.
- [2] 吴宗汉. 基础静电学[M]. 北京:北京大学出版社,2008.

[责任编辑] 闫雯雯

[收稿日期] 2008-09-24

(上接第35页)

经实际聆听可感觉,该放大器具有足够的动态范围,中频清晰饱满、柔和、圆润、高频明亮、通透,低频丰满、力度好,从整体上来感觉,声音比较平衡、真实^图。 无论驱动低阻耳机还是高阻耳机,都具有良好的听感效果。

6 总结

笔者设计了一款基于阴极跟随器和 SRPP 电路的 耳机放大器,理论分析为控制电路参数提供了明确依据,客观测量亦验证了理论的正确性。用微变等效分 析方法对于电子管耳机放大器的设计具有良好的指导 作用。

参考文献

- [1] AYRES W R. Choice of electron tubes for audio circuits[J]. J. Audio Eng. Soc., 1953, 1(1):49-52.
- [2] LEACH W M Jr. SPICE models for vacuum-tube amplifiers[J]. J. Audio Eng. Soc., 1995, 43(3):117-126.

- [3] SJURSEN W. Improved spice model for triode vacuum tubes[J]. J. Audio Eng. Soc., 1997, 45(12):1082–1088.
- [4] 郑国川,李洪英. 电子管手册[M]. 福建:科学技术出版 社,2002.
- [5] 喜安善市,伏见和朗. 放大电路设计[M]. 北京:科学出版 社 2002
- [6] 何亚宁. 电流负反馈放大器的原理分析与 CAA 计算机 辅助分析设计[J]. 电声技术,1999(3):12-19.
- [7] 周静雷,景军锋,陈斌. 扬声器系统瞬态特性的过渡过程 分析[J]. 声学技术,2007,26(4):655-659.
- [8] 郑晓宁,孟子厚. 扬声器失真评价参数与主观音质评价 参数的关系[J]. 声学技术,2006,25(6):555-559.

作者简介

周静雷,博士,副教授,主要研究方向为电声学、音频测量; 王璠,硕士,主要研究方向为自动化;

康雪娟,硕士,主要研究方向为工业检测。

[责任编辑] 史丽丽

[收稿日期] 2008-09-28