

模电实验报告 5：集成功率放大器

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 实验目的

1. 进一步熟悉集成功率放大器的工作原理。
2. 掌握测量集成功率放大器性能的方法。

2 实验仪器

双踪示波器、信号发生器、交流毫伏表、数字万用表。

3 预习内容

1. 功率放大器的工作原理。
2. 阅读附录 3，分析 LM386 原理电路在 1、8 端开路时的电压放大倍数为什么为 20。
3. 阅读附录 3，试述图 (1) 中的四个电容的作用。

4 实验内容

通常一个实用的放大器包括输入放大器，电压放大器和输出放大器。输入放大器的主要任务是接收传感器输出的小信号，通常要求输入放大器在具有电压放大能力的同时还具有高输入电阻、高抗干扰能力和低噪声。电压放大器的主要任务是不失真地提高输入信号的幅度。输出放大器的主要任务是驱动末级负载。负载是多种多样的，负载电阻的阻值越小，负载越重。有的负载较重，例如，扬声器，电机等。这就要求放大器能输出一定的信号功率，通常称这样的输出放大器为功率放大器。功率放大器主要任务是在信号不失真或轻度失真的条件下提高输出功率。通常工作在大信号状态下，要求输出功率大、效率高的同时，还要考虑减小非线性失真、功率管的散热、过压过流保护等。静态电流是造成管耗的主要因素，因此在低频功放中主要采用静态工作点低的甲乙类和乙类功率放大器。实验电路如图 (1)。

1. 对 LM386 内部等效电路的分析

LM386 为单直流电源供电的普通音频功率放大器，常用于袖珍式收音机、磁带放音机，其等效原理示意图如图 (2)。等效原理示意图并不是真实的电路图，而是为了使用者了解集成电路的原理，从而正确地设计外电路，而画出的等效原理电路。

LM386 由输入级、中间级和输出级三部分组成。三极管 Q_1 Q_4 构成复合管差动输入级， Q_5 、 Q_6 构成的镜像电流源作为差动放大器的集电极有源负载。输入级的单端输出信号由 Q_4 的集

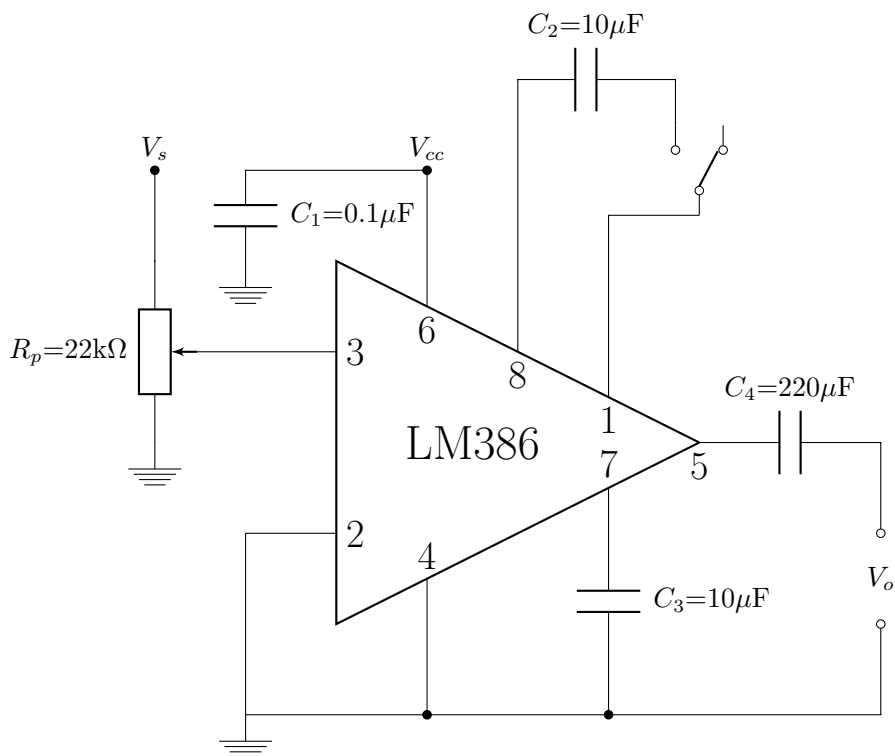


图 1: 集成功率放大器电路图

电极传送至由 Q_7 组成的中间级，该级是以恒流源为集电极负载的共射极放大器。 Q_8 、 Q_9 、 Q_{10} 和 D_1 、 D_2 组成通常的甲乙类互补对称输出级。 Q_9 、 Q_{10} 等效于一个 PNP 型管，这是考虑到集成电路中 PNP 管的电流放大系数较低，故用复合管提高电流放大系数。 D_1 、 D_2 为输出级提供适当的偏压，以克服交越失真，保证电路工作在甲乙类工作状态。

差分输入级的静态工作电流，分别由输出端经 R_3 和电源正端通过电阻 R_7 和 R_6 来供给。“6”端为直流偏置电压 V_{CC} ，“5”端为输出端，其静态电压为 $V_{CC}/2$ ， Q_3 发射极静态电流与 Q_4 发射极静态电流相等。差分输入级电路左右对称。所以，差分输入级有较高的 CMRR。

通常，功率放大器的信号源内阻并不大，所以在差分输入级的两个输入端对地接了 $50k\Omega$ 电阻，以减小输入电阻，这对输入信号的衰减可忽略，但可减少高内阻共模信号的接收，减少输出端的共模干扰。输入级和中间级因为用恒流源做集电极负载，所以具有很高的电压放大倍数，因此可引入级间负反馈，以大大改善电路的性能。反馈支路由 R_3 和 R_4 、 R_5 组成。若将差分输入级用一对称轴（虚线）划分两半，则阻值 $R=(R_4+R_5)/2=750\Omega$ 处为等效交流地电位点。用瞬时极性法可以判断，所引入的是电压串联负反馈，其反馈系数为： $F_v=R/(R_3+R)$ 。这样就能维持电压放大倍数恒定。输入信号可以从两端输入，也可以从单端输入。若如本实验电路，“3”端为输入，“4”端接地，则 LM386 的电压放大关系可等效为图 (3)，为同相输入电压放大器。若“1”、“8”端交流开路，其交流放大倍数约为

$$A_V \approx \frac{1}{F_V} = 1 + \frac{R_3}{R} = 21 \quad (1)$$

若“1”、“8”端接 $10\mu F$ 电容，可近似“1”、“8”端短路，其电压放大倍数约为

$$A_V = \frac{1}{F_V} = 1 + \frac{R_2}{R_5/2} = 201 \quad (2)$$

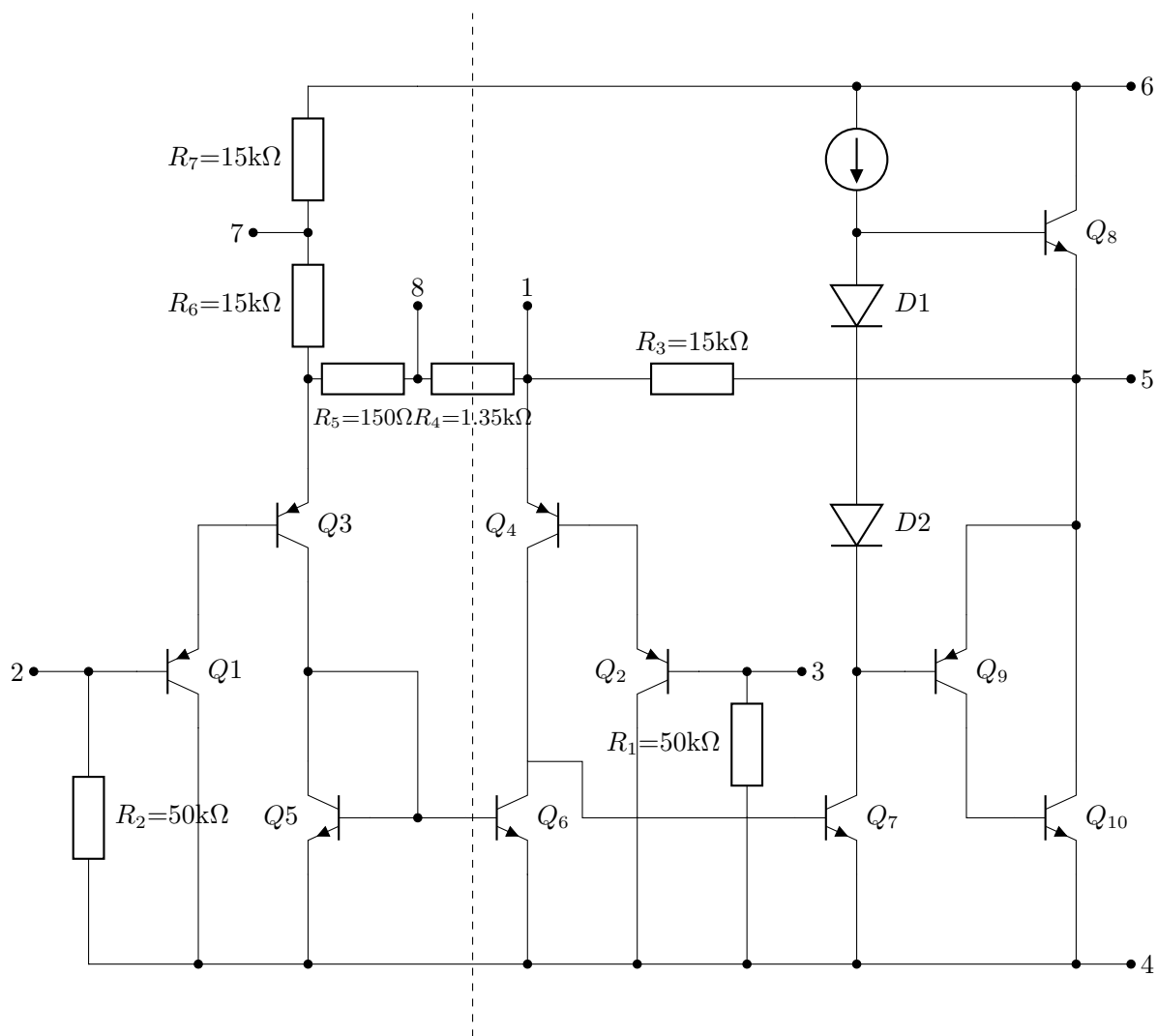


图 2: LM386 等效原理示意图

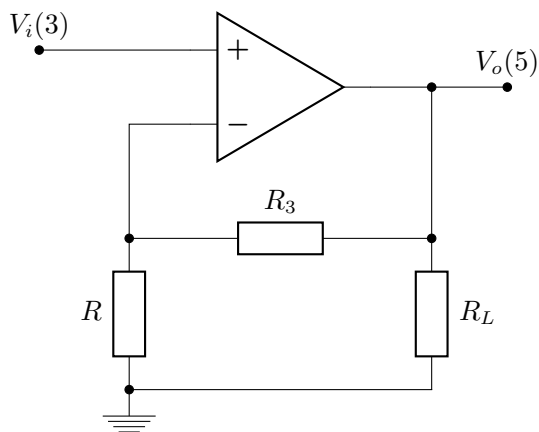


图 3: LM386 等效放大电路

对图 (1) 中的电容 C_3 的作用试述如下。若不接 C_3 ，对于交流信号，在图 (2) 中，“6”端接 V_{CC} ， V_{CC} 内阻通常小于 1Ω ，因此可近似为交流信号从 Q_3 发射极经 R_6 、 R_7 两个 $15k\Omega$ 电阻到地；输出负载通常为几 Ω 至几十 Ω ，因此可近为交流信号从 Q_4 发射极经 R_3 一个 $15k\Omega$ 电

阻到地；所以差动输入级对于交流信号是严重不平衡的。接 C_3 后，对于直流没有作用，对于交流使 Q_3 、 Q_4 到地的电阻值近似相等，从而使差动输入级能正常放大差模信号和抑制共模干扰。

2. 实验内容

本实验电路用的是 LM386-2，其最大输出功率为 0.5W。实验中“1”、“8”端开路，LM386 的电压放大倍数约为 20 倍，负载为 8Ω 的喇叭，所以输入电压有效值不能超过 100mV，为减少损坏，加在图 (1) 所示电位器 R_p 上端的电压不得超过 90mV。

- 取 $V_{CC}=12V$ ，有效值 $v_i=50mV$ ，开关 K 打开，不接负载，改变频率，测量功放的幅频特性，绘制幅频特性曲线。
- 接负载 $R_L=8\Omega$ 的喇叭，重复 (1)。将幅频特性曲线与 (1) 的绘制在同一张图上。
- $V_{CC}=12V$ ， $f=1kHz$ ，开关 K 打开，不接负载，改变输入电压（请特别注意，输入不得超过 90mV!! 否则有可能损坏 LM386!!），测量功放的输入-输出特性曲线。建议按表 (1) 要求测量。
- 接负载 $R_L=8\Omega$ 的喇叭，重复 (3)。将输入-输出特性曲线与 (3) 的绘制在同一张图上。建议按表 (1) 要求测量。
- 取 $V_{CC}=5V$ 、 $9V$ 、 $12V$ ， $f=1kHz$ ，有效值 $v_i=50mV$ ，测量并估算功放的输出交流功率 P_o 、直流电源消耗功率 P_V （忽略 LM386 中电压放大电路的功耗，仅计及功率放大电路的功耗）和效率 η 。对于正弦信号，在正半周 Q_8 导通， Q_9 、 Q_{10} 组成的复合管截止， Q_8 集电极上的功耗为

$$P_{Q_8} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{V_{CC}}{2} - v_o \right) \frac{v_o}{R_L} d(\omega t) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{V_{CC}}{2} - v_{om} \sin(\omega t) \right) \frac{v_{om} \sin(\omega t)}{R_L} d(\omega t) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{V_{CC} v_{om}}{2R_L} \sin(\omega t) - \frac{v_{om}^2}{R_L} \sin^2(\omega t) \right] d(\omega t) \quad (5)$$

$$= \frac{1}{R_L} \left(\frac{V_{CC} v_{om}}{2\pi} - \frac{v_{om}^2}{4} \right) \quad (6)$$

在负半周 Q_8 截止， Q_9 、 Q_{10} 组成的复合管导通，复合管等效集电极上的功耗 $P_{Q_9,10} \approx P_{Q_8}$ 。负载在一个周期中得到的功率为

$$P_o = \frac{v_{om}^2}{2R_L} = \frac{v_{rms}^2}{R_L} \quad (7)$$

其中， v_{om} 为正弦信号的幅值， v_{rms} 为正弦信号的有效值。所以直流电源的功耗为

$$P_V \approx 2P_{Q_8} + P_o = \frac{V_{CC} v_{om}}{\pi R_L} = \frac{V_{CC} \sqrt{2} v_{rms}}{\pi R_L} \quad (8)$$

效率近似为

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} = \frac{\pi v_{om}}{2V_{CC}} = \frac{\pi v_{rms}}{\sqrt{2} V_{CC}} \quad (9)$$

5 实验数据

1. 幅频响应

幅频响应的数据如下，注意两次的 v_s 不同。

(a) 空载

此时 $v_i = 50.051\text{mV}$, $v_o = 1.0776\text{V}$, 得到 $v_{o'} = 0.7619\text{V}$. 通频带为:

$$f_L = 1\text{Hz}, f_H = 469\text{kHz}$$

(b) 有载

此时 $v_i = 30.624\text{mV}$, $v_o = 611.994\text{mV}$, 得到 $v_{o'} = 432.745\text{mV}$. 通频带为:

$$f_L = 114\text{Hz}, f_H = 741\text{kHz}$$

因为仅仅测量了三个数据点，不足以画出真实的幅频特性曲线，因此在最后的原始数据胖手工绘制草图。

2. 输入输出曲线

输入输出特性的数据如表 (1):

表 1: 输入输出特性曲线

空载	$V_i(\text{mV})$	10.340	20.027	30.712	40.666	50.370	60.435	70.762	79.784
	$V_o(\text{mV})$	214.341	427.522	659.351	875.732	1085.275	1302.617	1526.101	1720.312
有载	$V_i(\text{mV})$	10.108	20.059	30.025	40.225	50.295	60.245	70.160	79.862
	$V_o(\text{mV})$	191.050	394.102	599.005	801.348	1004.783	1204.977	1404.835	1599.628

根据表 (1)，画出输入输出特性曲线，如图 (4):

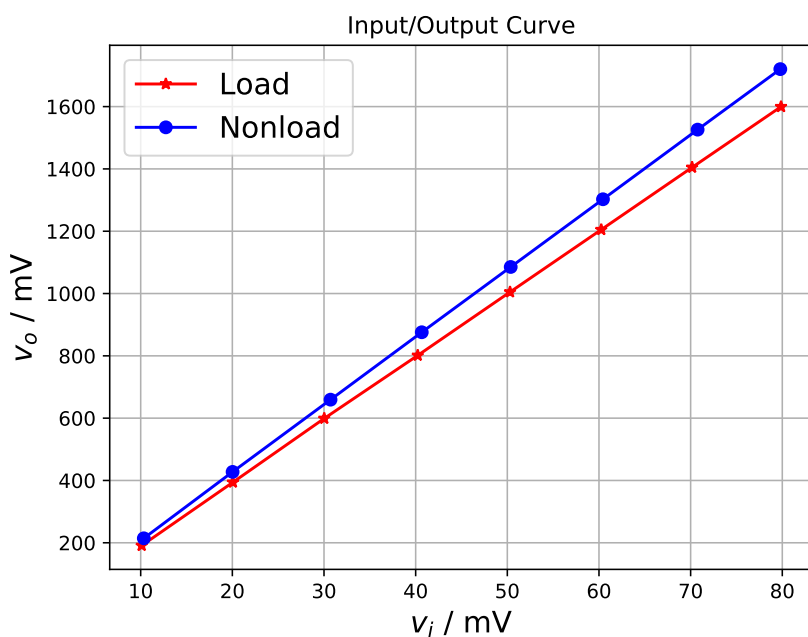


图 4: 输入输出特性曲线

3. 效率

在 $v_i=50.212\text{mV}$ 下，实验测得 $v_{orms}=1006.269\text{mV}$ ，算得效率为：

$$\eta = \frac{\pi v_{orms}}{\sqrt{2}V_{CC}} \approx 18.63\% \quad (10)$$

6 误差分析

1. 低频截止频率

在测量空载低频截止频率时，我们发现测量值已经小于 6Hz，并且万用表示数波动范围非常大。因此空载低频截止频率的误差较大。

2. 谐波失真

在网站上的视频中我们注意到，在示波器上的波形已经肉眼可见明显的非线性谐波失真，说明该实验中非线性谐波失真是很严重的。

7 思考题

1. 试画出进一步简化的、说明 LM386 的电压放大倍数的示意图。

进一步简化的 LM386 等效电路图如图 (5) 所示：

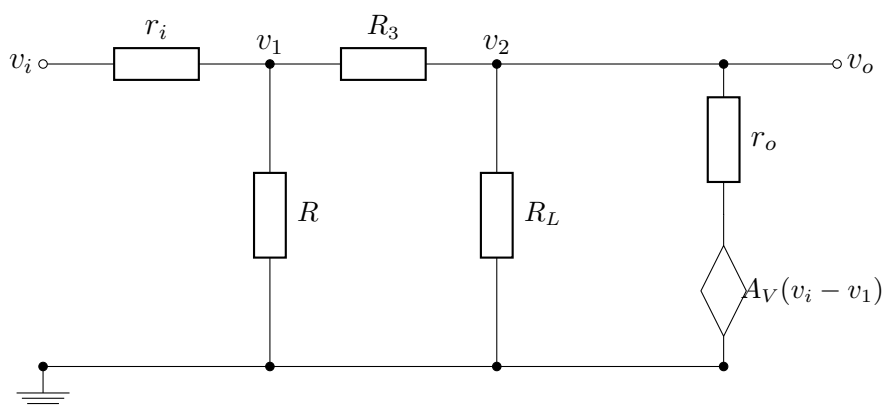


图 5: LM386 简化等效电路图

通过计算 v_1 和 v_2 处的电压关系，可以近似得到如式 (1) 所示的电压放大倍数。

2. 试述图 (1) 中的四个电容的作用，以及改变电容参数对整个电路的性能的影响。

在实验中只用了三个电容： C_1 、 C_3 、 C_4 ，它们的作用基本都是滤波，细节分别为：

- (a) C_1 直流电压耦合，起“水塘”作用，减小直流电压中可能存在的交流成分对电路静态的影响。
- (b) C_3 改变共模抑制比。

如前文所述：若不接 C_3 ，对于交流信号，在图 (2) 中，“6”端接 V_{CC} ， V_{CC} 内阻通常小于 1Ω ，因此可近似为交流信号从 Q_3 发射极经 R_6 、 R_7 两个 $15\text{k}\Omega$ 电阻到地；输出负载通常为几 Ω 至几十 Ω ，因此可近为交流信号从 Q_4 发射极经 R_3 一个 $15\text{k}\Omega$ 电阻到地；所以差动输入级对于交流信号是严重不平衡的。接 C_3 后，对于直流没有作用，对于交流使 Q_3 、 Q_4 到地的电阻值近似相等，从而使差动输入级能正常放大差模信号和抑制共模干扰。

(c) C_4 取交隔直, 起负电源作用。

改变这些电容的参数会影响电路的交直流性能, 但具体影响不清楚。

3. 试述负载对功放性能的影响。

加上负载后, 集成功率放大器的输出电压略有减小, 但是相比其绝对值并不算大, 因此可认为对性能没有太大影响。

4. 试述电源电压对功放性能的影响。若要求改善功放的输入-输出特性应提高还是降低电源电压?

根据式 (9) 可知, 在输入输出电压不变的情况下, 效率仅与 V_{CC} 有关, V_{CC} 越小, 效率越高。另外, 直流电压越低, 输入输出曲线的线性越好。要改善放大器的输入输出特性, 应该降低电源电压。

参考文献

[1] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分). 高等教育出版社, 2006.