

电子线路设计与测试

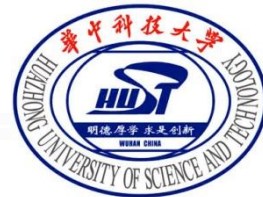
第三阶段

音响放大器设计与调试

P143

几种集成运算放大器的典型参数(P64)

芯片型号		$\mu A741$ (单)	OP07C	NE5532 (双)	LF347 (四)	LM324 (四)
电源电压	双电源	$\pm 3V \sim \pm 18V$	$\pm 3V \sim \pm 18V$	$\pm 3V \sim \pm 20V$	$\pm 1.5V \sim \pm 16V$	$\pm 18V$
	单电源	—	—	—	—	$3V \sim 32V$
输入失调电压 V_{io}		1.0mV	250 μ V	0.5mV	5 mV	2mV
输入失调电流 I_{io}		20nA	8nA	10nA	25 <u>pA</u>	5 <u>nA</u>
输入偏置电流 I_{IB}		80nA	± 9 <u>nA</u>	200nA	50 <u>pA</u>	45nA
开环电压增益 A_{vo}		2×10^5	4×10^5	50×10^4 ($R_L = 600\Omega$)	1×10^5	1×10^5
输入电阻 r_{i1}		2.0M Ω	33 M Ω	0.3 M Ω	$10^8 \Omega$	—
单位增益带宽 BW_{CL}		1MHz	0.6MHz	10 MHz ($C_L = 100pF, R_L = 600 \Omega$)	4 MHz	1MHz
转换速率 S_r		0.5V/ μs	0.3V/ μs	9 V/ μs	13 V/ μs	—
共模抑制比 K_{CMR}		90 dB	120 dB	100 dB	100 dB	85 dB
功率消耗		60mW	150mW	780 <u>mW</u>	570mW	1130 <u>mW</u>
输入电压范围		$\pm 13V$	$\pm 14V$	\pm 电源电压	$\pm 15V$	$-0.3V \sim 32V$
说 明		通用型	低噪声	低噪声	<u>高阻型</u> (JFET)	通用型



增益带宽积

增益带宽积 $A_V * BW = C$ （常数）

运放的增益带宽积是指运算放大器的差模增益与其工作频率带宽的乘积。

增益带宽积 $A_V * BW = C$ ，器件指标给出的是单位增益带宽积，即 $A_V = 1$ 时的带宽。

转换速率

运放的转换速率是指运放在大幅度阶跃信号作用下，输出信号所能达到的最大变化率。



使用注意事项

输入电阻 R_i --差模输入电阻虽然很大，分析时仍需根据实际电路，决定是否忽略。

输出电阻 R_o ---输出电阻虽然很小，NE5532的 $R_o \approx 75 \Omega$ ，但不能接很重的负载，内部限流电路使输出电流为几十mA

在给定电压增益下，运放的最高工作频率受到增益带宽积的限制。

转换速度越高，说明运放对输入信号的瞬时变化响应越好。

一、实验目的

- 音响放大器的基本组成
- 音调特性控制方法与实现原理
- 了解集成功率放大器内部电路工作原理，掌握其外围电路的设计与主要性能参数的测试方法；
- 掌握音响放大器的设计与电子线路系统的装调技术——综合运用所学知识，进行小型多级电子线路系统的设计与装调。

设计任务

■ 功能要求:

- ☐ 具有话音放大、音调控制、音量控制、卡拉OK伴唱等功能

■ 已知条件:

- ☐ 集成功放LM386
- ☐ 高阻话筒 $20\text{k}\Omega$ ，输出信号 5mV
- ☐ 集成运放NE5532
- ☐ $10\Omega/2\text{W}$ 负载电阻1只
- ☐ $8\Omega/4\text{W}$ 扬声器1只
- ☐ 音源（MP3 or PC）
- ☐ 电源电压 $\pm 9\text{V}$ (双电源)

设计任务

■ 技术指标要求:

- 额定功率: $P_o \geq 0.3W$ ($\gamma < 3\%$)
- 负载阻抗: $R_L = 10\Omega$
- 频率响应: $f_L = 50Hz$, $f_H = 20kHz$
- 输入阻抗: $R_i \gg 20k\Omega$
- 音调控制特性 (选做): 1kHz处增益为0dB、125Hz和8kHz处有 $\pm 12dB$ 的调节范围, $A_{VL} = A_{VH} \geq 20dB$

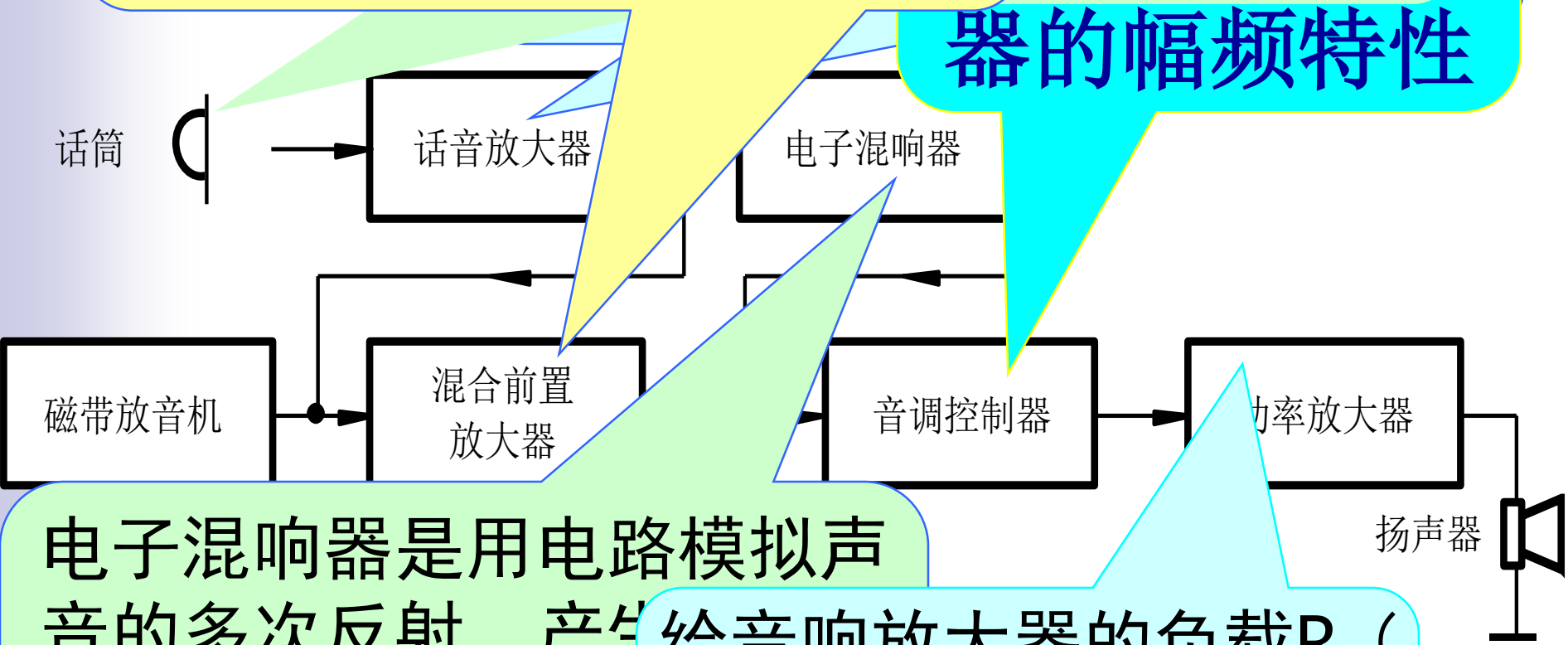
选做

- 音调调谐电路的设计、仿真与实现

将磁带放音机输出的音乐信号与话音放大后的声音信号混合放大。

mV左右，而输出阻抗的话筒等)

器的幅频特性

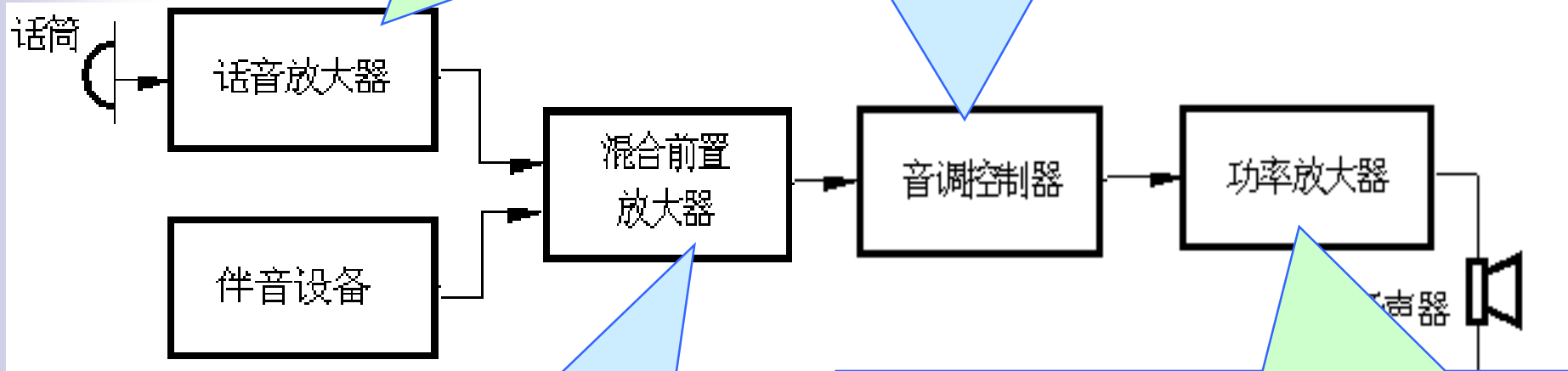


电子混响器是用电路模拟声音的多次反射，产生声音的深度感和空间立体感。

给音响放大器的负载 R_L (扬声器) 提供一定的输出功率。

要求能对话筒的输出信号进行扩音

具有音调输出控制功能



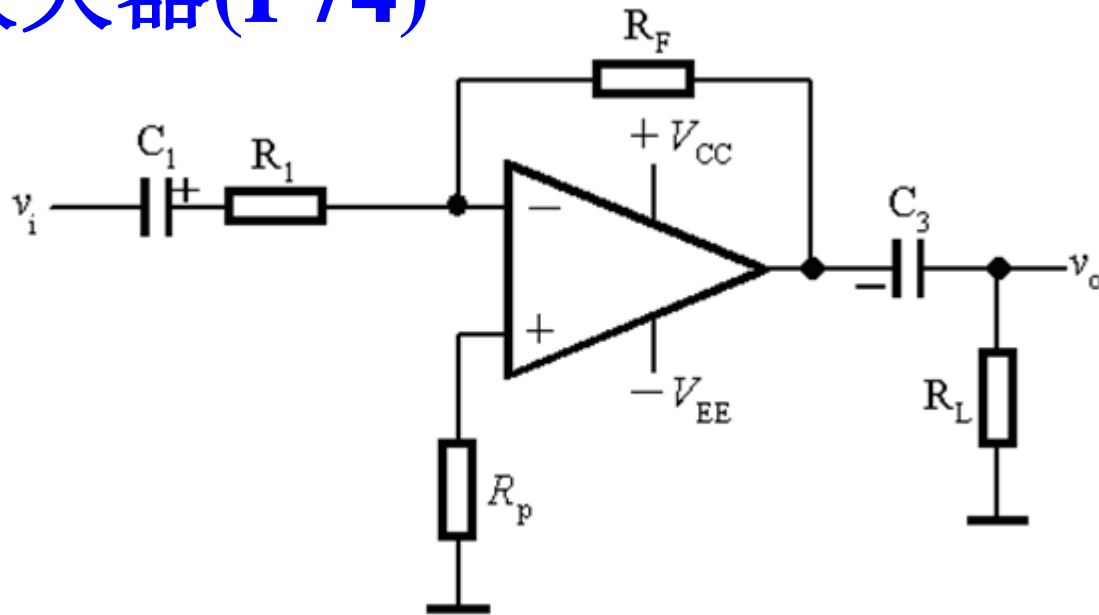
需将两种声音混合起来

输出一定额定功率

1. 话音放大器

- 话筒的输出信号一般只有 5mV 左右，话筒的输出阻抗有高阻（约 $20\text{k}\Omega$ ）、亦有低输出阻抗的话筒，如 20Ω ， 200Ω 等。
- 话音放大器的作用是不失真地放大声音信号，其输入阻抗应远大于话筒的输出阻抗。

反相交流放大器(P74)



$$A_{VF} = -R_F / R_1$$

$$R_i = R_1 \quad (R_1 \text{一般取几十千欧。})$$

耦合电容 C_1 、 C_3 可根据交流放大器的下限频率 f_L 来确定，一般取

$$C_1 = C_3 = (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi R_L f_L}$$

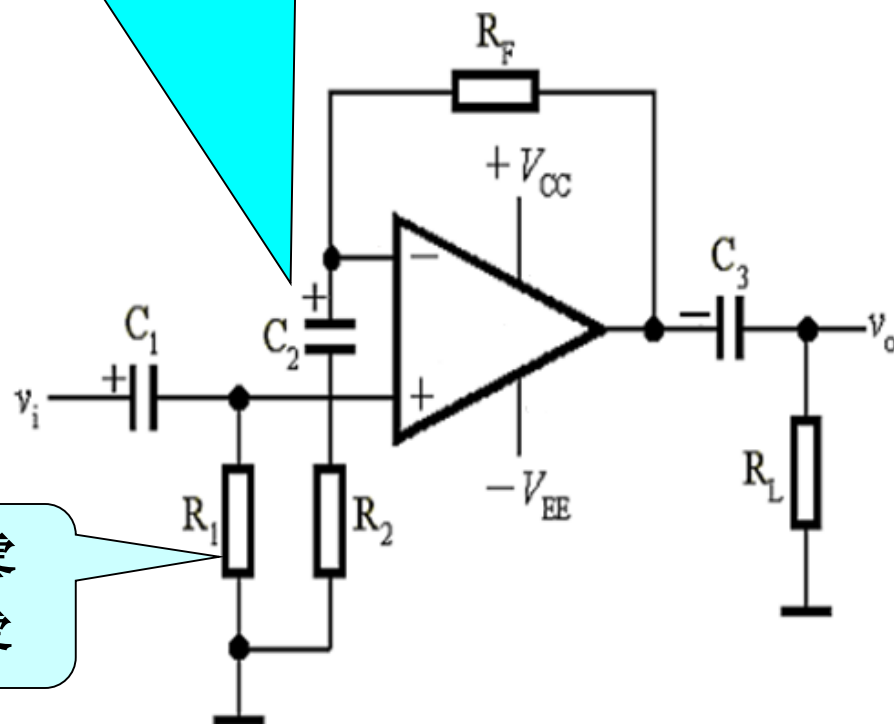
电容 C_1 、 C_2 及 C_3 为隔直电容

同相交流电压放大器

右图是运放同相交流电压放大器。

$$A_{VF} = 1 + \frac{R_F}{R_2}$$

电阻 R_1 接地是为了保证输入为零时，放大器的输出直流电位为零



交流放大器的输入电阻

$$R_i = R_1 \quad (R_1 \text{一般取几十千欧。})$$

耦合电容 C_1 、 C_3 可根据交流放大器的下限频率 f_L 来确定，一般取

$$C_1 = C_3 = (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi R_L f_L}$$

反馈支路的隔直电容 C_2 一般取几微法。

自举式交流电压放大器

如图所示是自举式同相交流电压放大器。

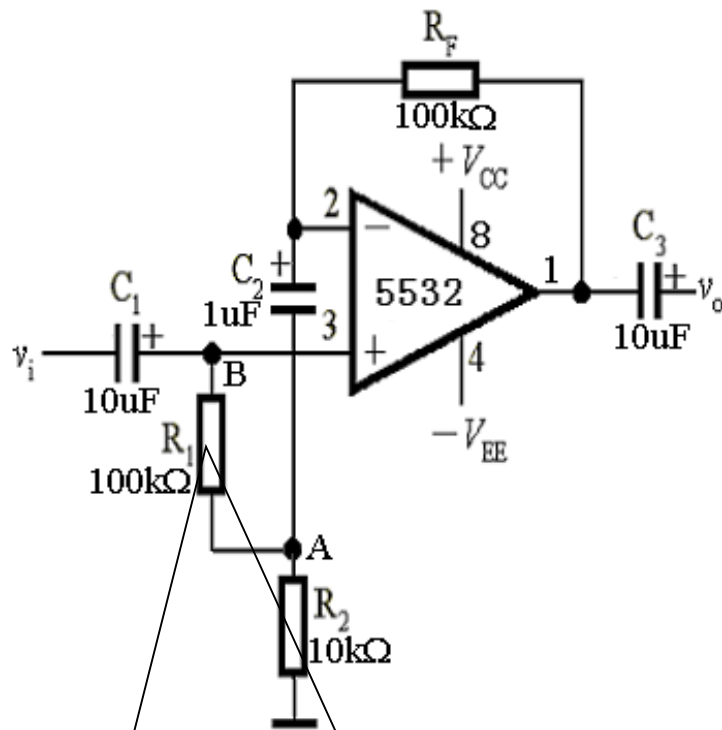
反馈电压
$$V_A = \frac{R_2}{R_2 + R_F} V_O$$

因为同相放大器的电压放大倍数 $A_{vF} = 1 + (R_F / R_2)$ ，故

$$V_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_2} \right) V_i$$

$$= \frac{R_2 + R_F}{R_2} V_B$$

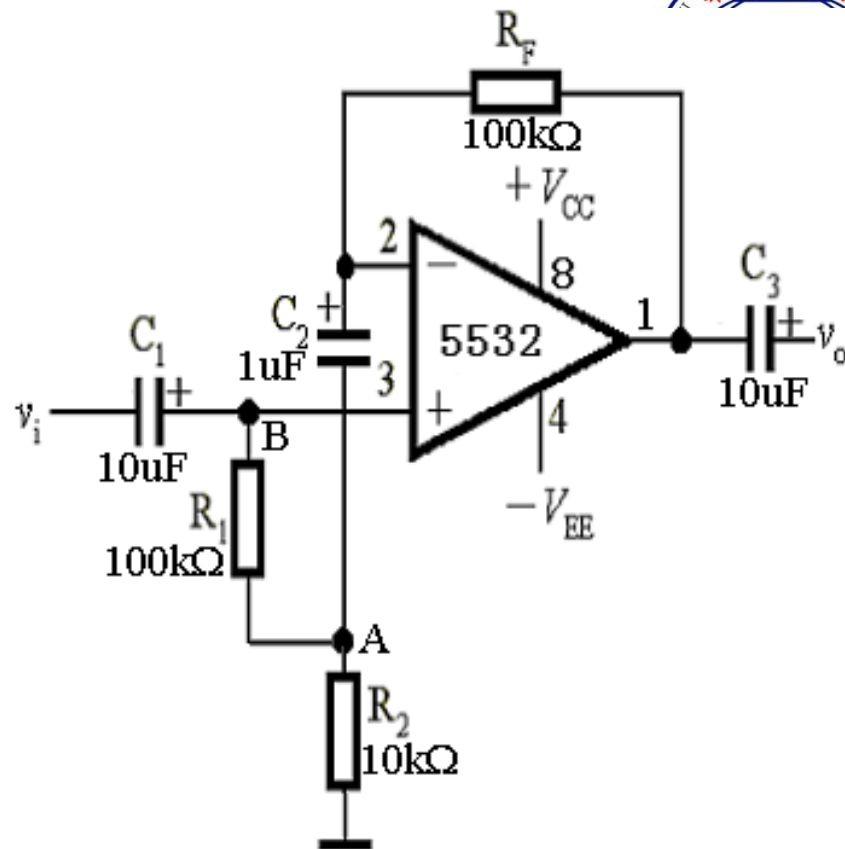
$$V_B = \frac{R_2}{R_2 + R_F} V_O \quad \text{有 } V_A = V_B$$



交流信号自同相端B点输入，
输出信号经 R_F 反馈至A点

自举式交流电压放大器

R_1 两端的电压相等，且相位相同，故称 R_1 为自举电阻。流经 R_1 的电流可视为零，从而大大提高了交流放大器的输入电阻。输入电阻



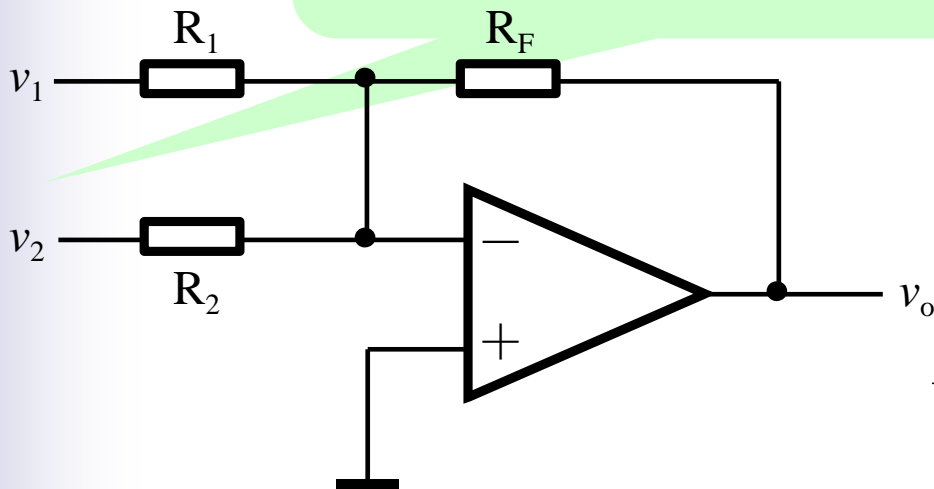
$$R_i = (R_1 // r_{id})(1 + A_{VO}F) + R_2 // R_F$$

式中， F 为反馈系数， $F = R_2 / (R_2 + R_F)$ ， A_{VO} 是运放的开环增益。

2.混合前置放大器

其作用是将磁带放音机输出的音乐信号与电子混响后的声音信号混合放大。

v_1 为话筒放大器输出电压
 v_2 为放音机输出电压



$$V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2\right)$$

f_{L1} 表示低音频转折频率，一般为几十赫兹

f_{L2} (等于1kHz) 表示中音频转折频率

f_{H1} 表示高频转折频率

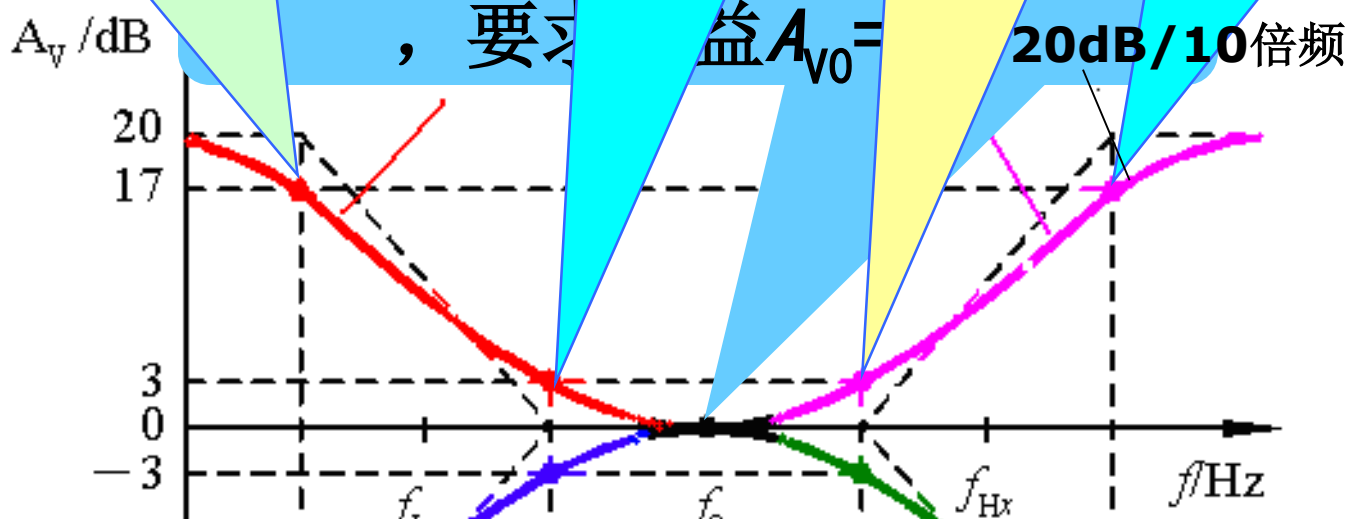
f_{H2} (等于 $10f_{H1}$) 表示高音频转折频率，一般为几十千赫兹

的幅频

(等于1kHz)

表示

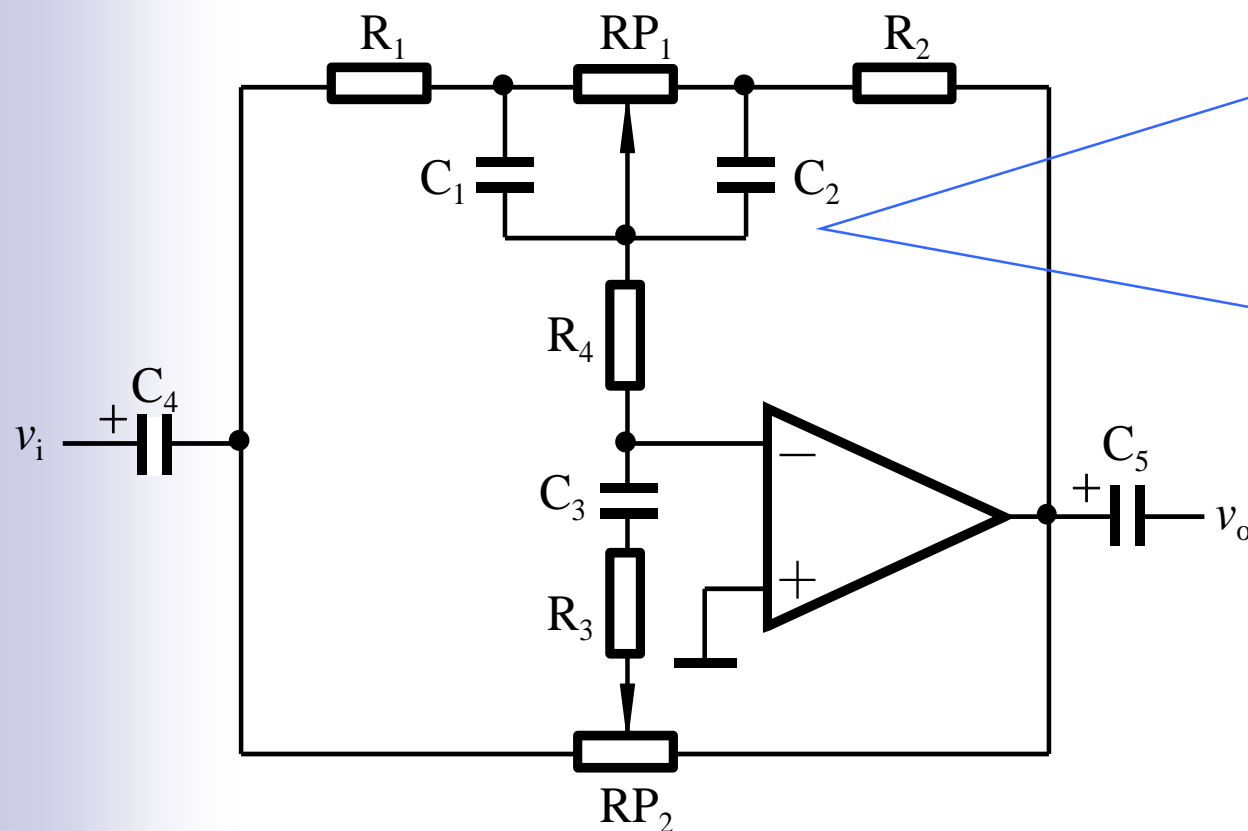
频



音调控制器只对低音频与高音频的增益进行提升与衰减，中音频的增益保持0dB不变。因此，音调控制器的电路可由低通滤波器与高通滤波器构成。

音调控制器的电路

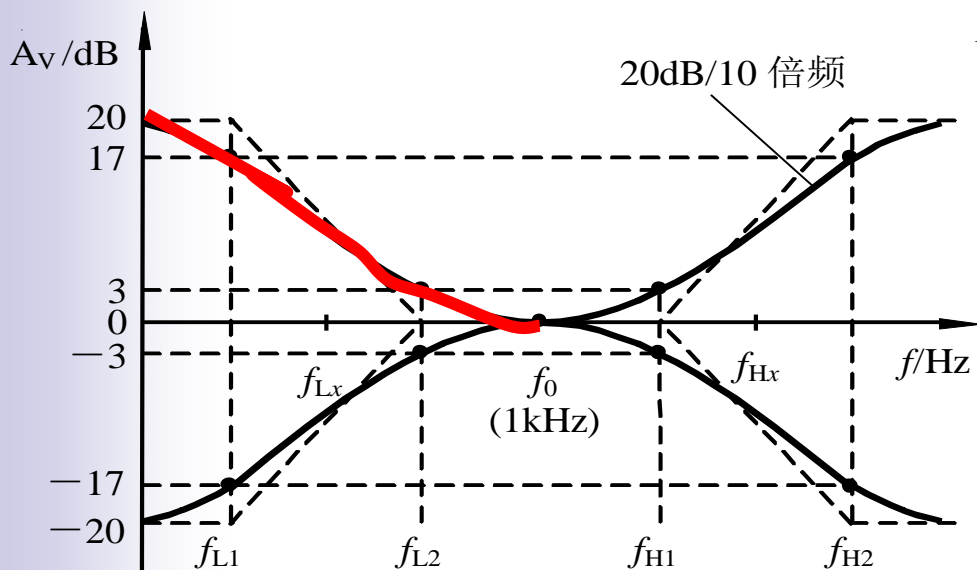
由低通滤波器与高通滤波器构成音调控制器



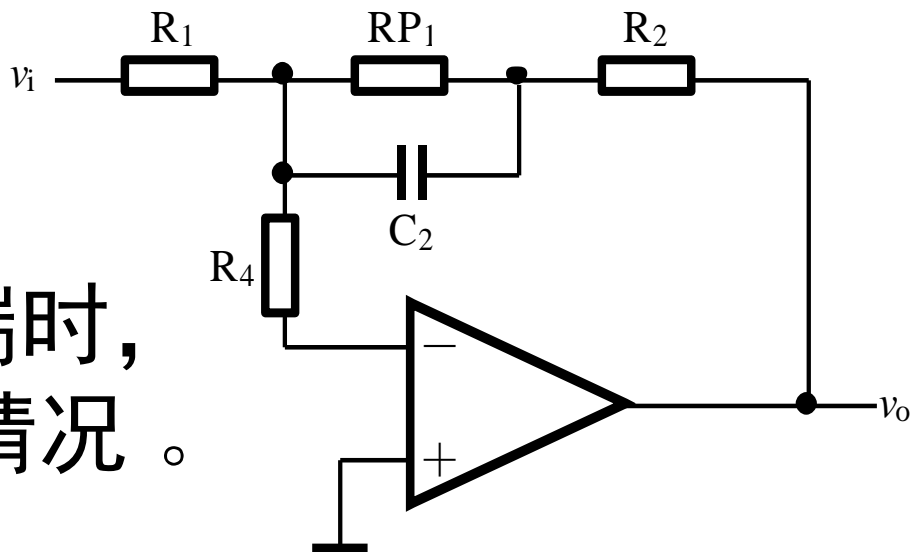
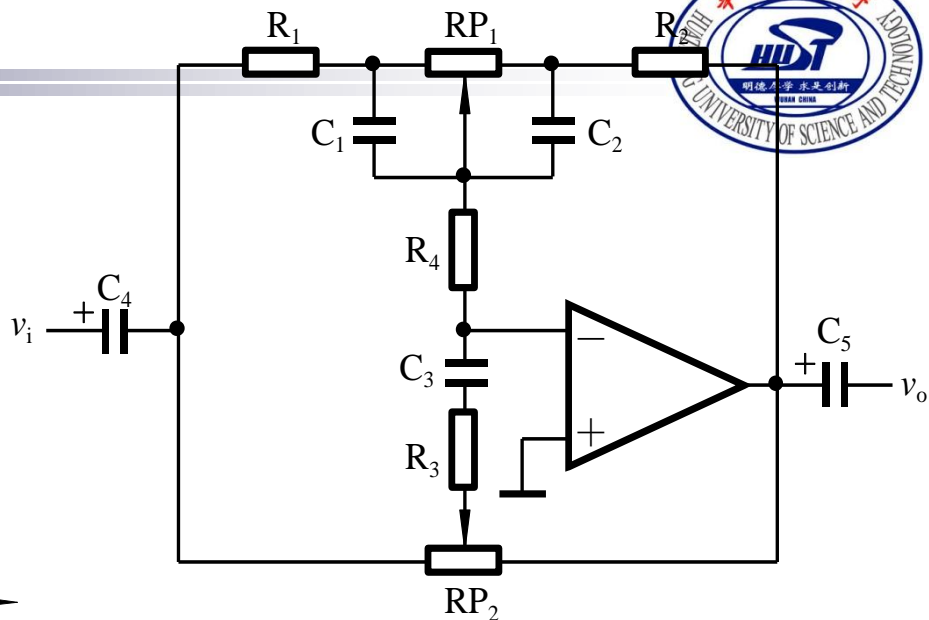
设电容

$C_1 = C_2 \gg C_3$, 在中、低音频区, C_3 可视为开路, 在中、高音频区, C_1 、 C_2 可视为短路。

①当 $f < f_0$ 时

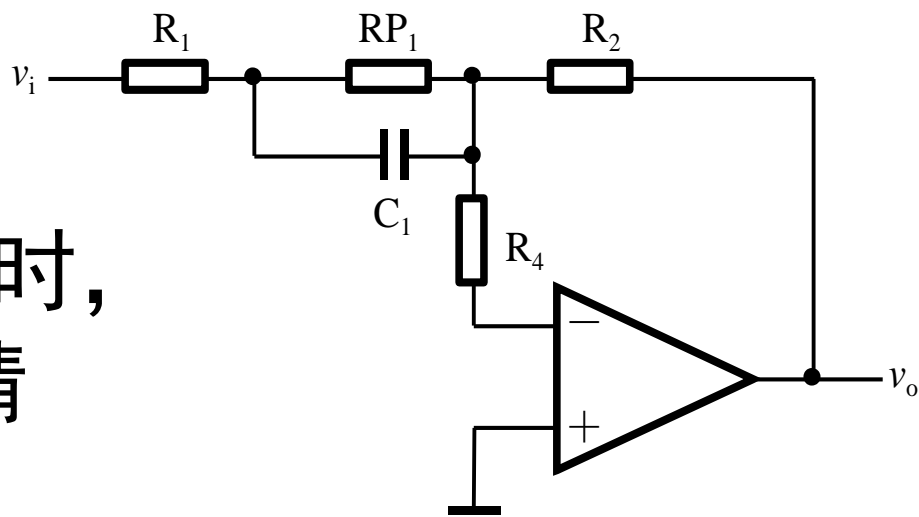
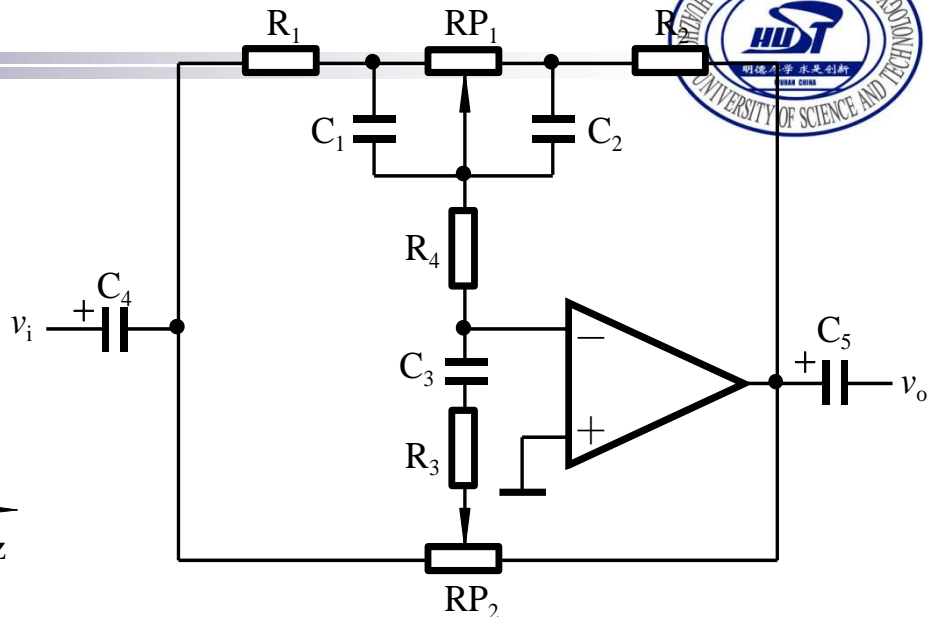
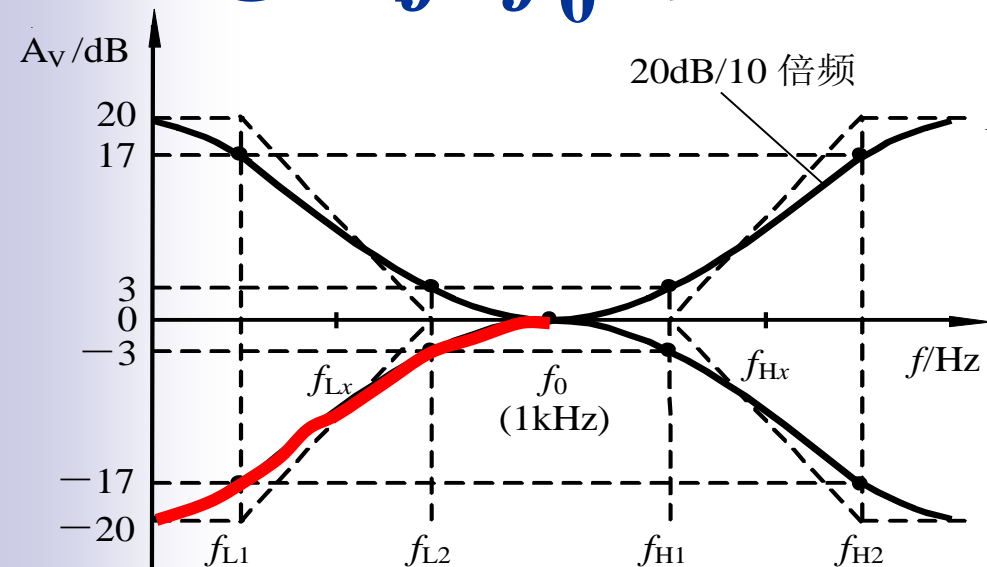


当 RP_1 的滑臂在最左端时，
对应于低频提升最大的情况。



(a)

①当 $f < f_0$ 时

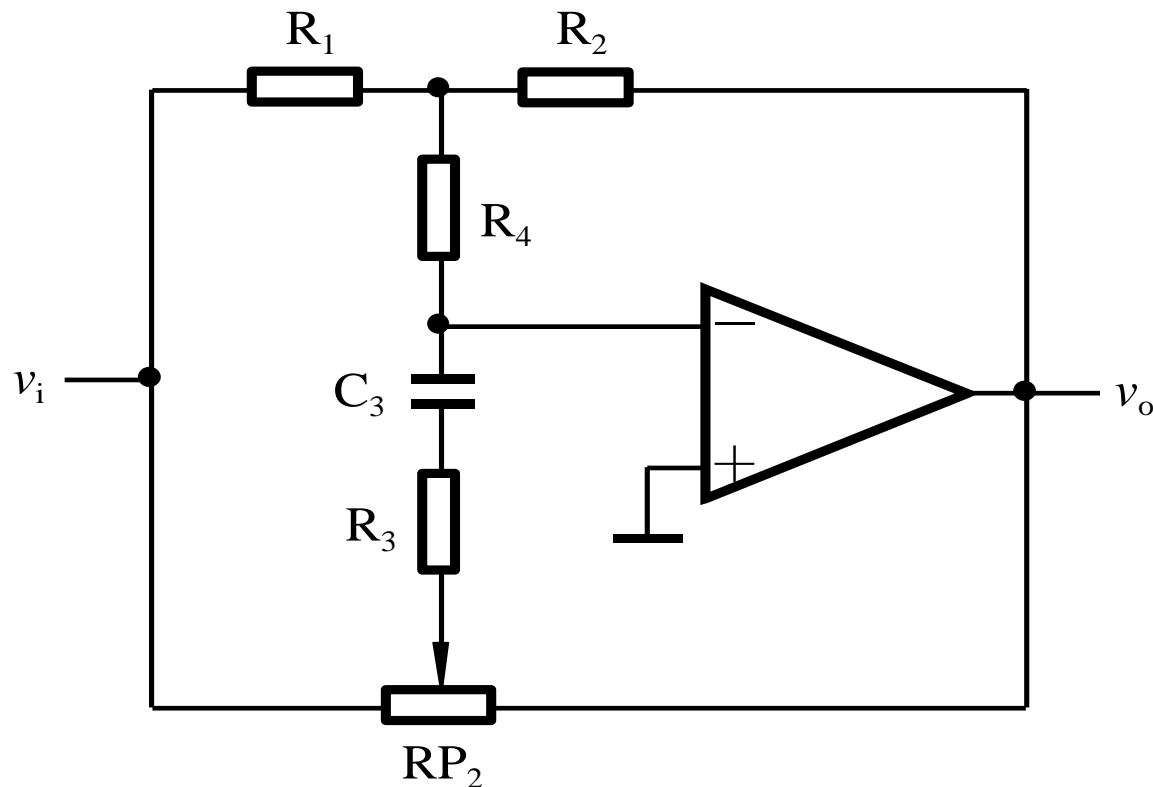


当 RP_1 滑臂在最右端时，
对应于低频衰减最大的情况。

(b)

②当 $f > f_0$ 时

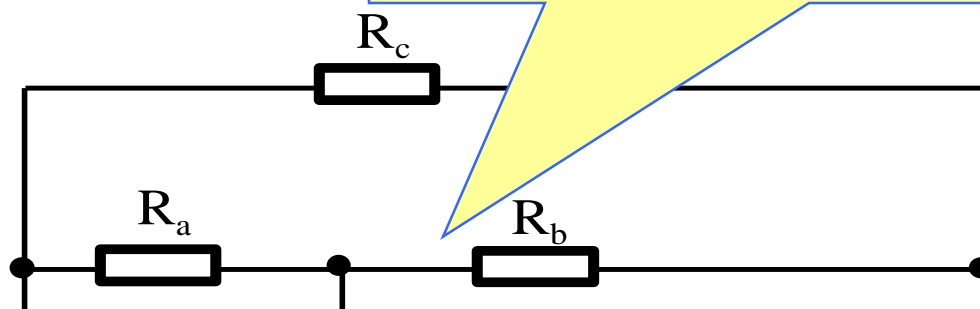
C_1 、 C_2 可视为短路，作为**高通滤波器**。
音调控制器的高频等效电路如图所示：



②当 $f > f_0$ 时

将 C_1 、 C_2 视为短路，
将其转换成三角形连接

$$\left. \begin{aligned} R_a &= R_1 + R_4 + (R_1 R_4 / R_2) \\ R_b &= R_4 + R_2 + (R_4 R_2 / R_1) \\ R_c &= R_1 + R_2 + (R_2 R_1 / R_4) \end{aligned} \right\}$$

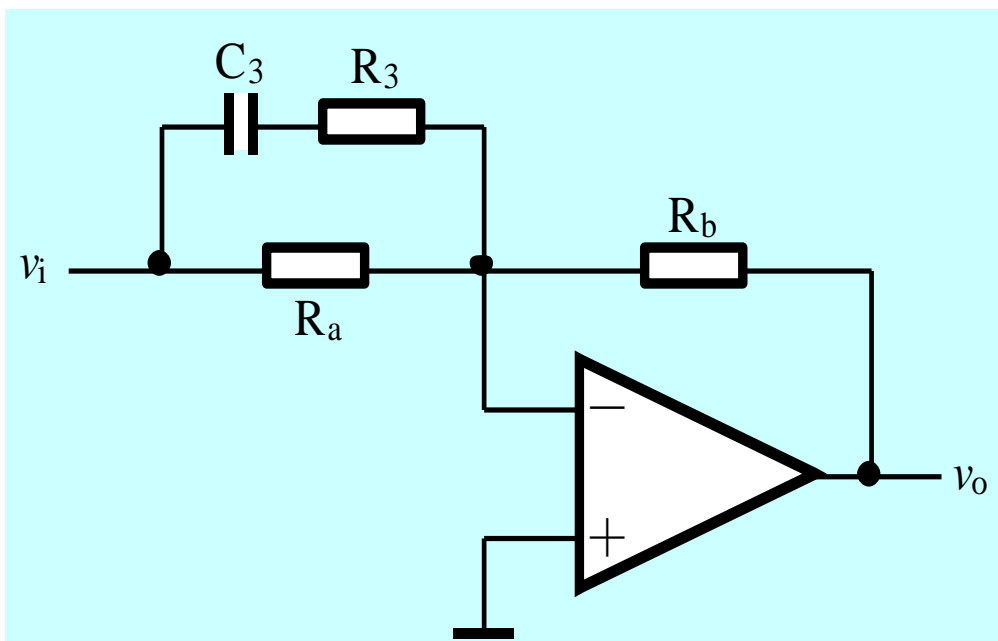
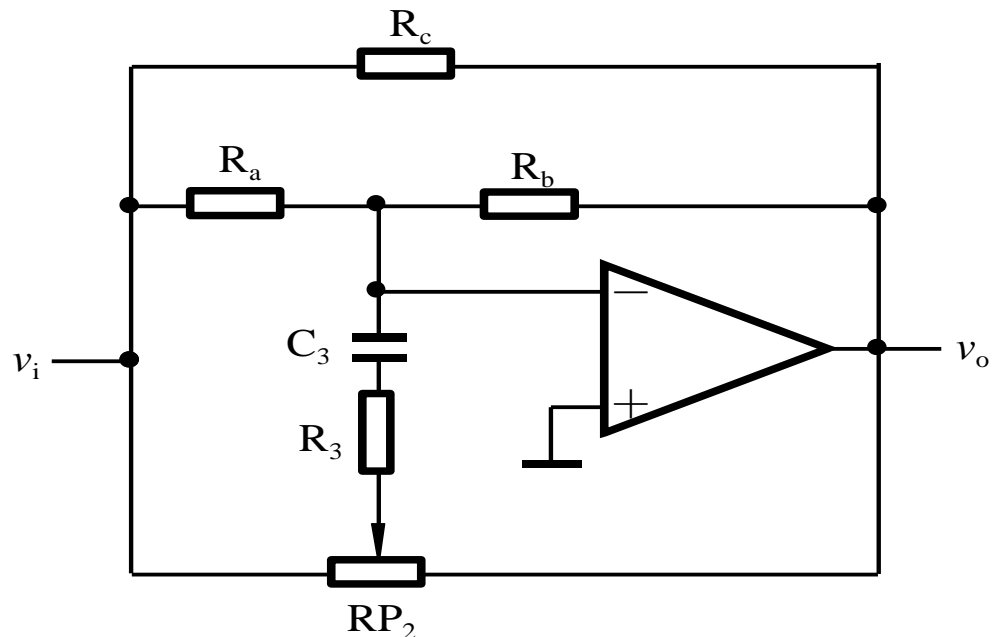


若取 $R_1 = R_2 = R_4$ ，则

$$R_a = R_b = R_c = 3R_1 = 3R_2 = 3R_4$$

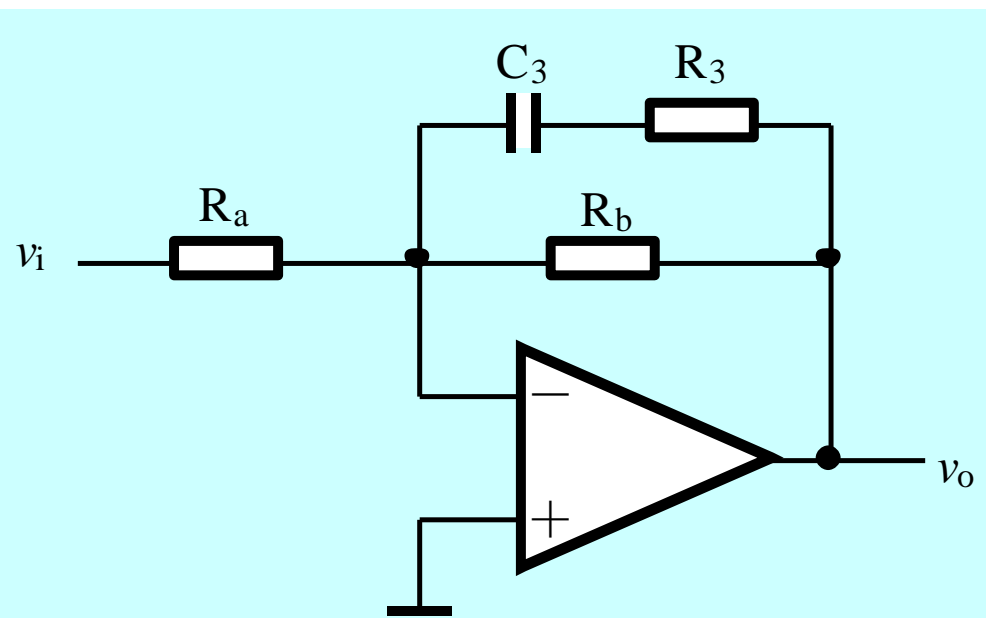
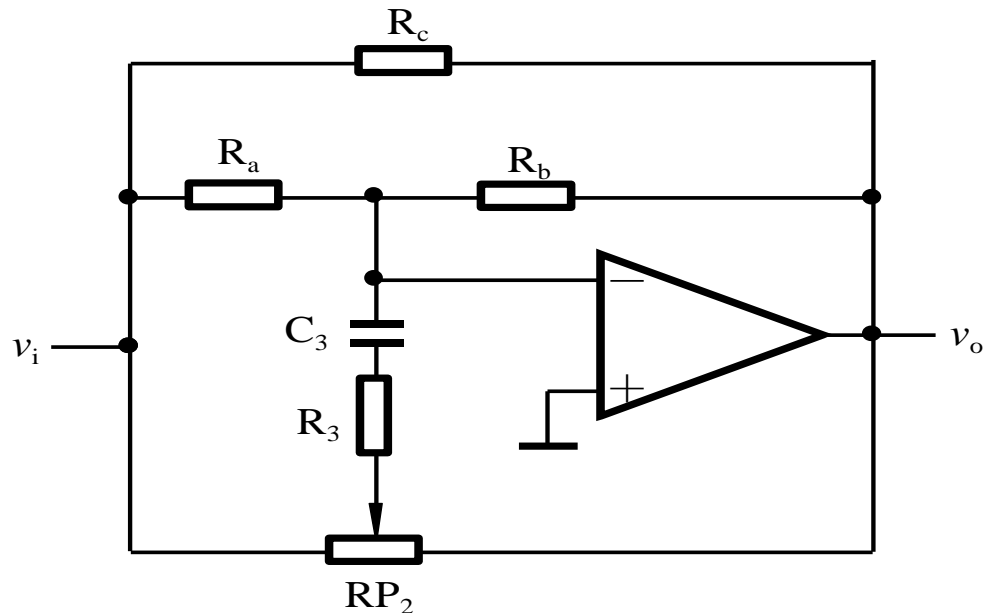
②当 $f > f_0$ 时

RP₂的滑臂在最左端时，对应于高频提升最大的情况，等效电路见右图：



②当 $f > f_0$ 时

RP₂的滑臂在最右端时，对应于高频衰减最大的情况，等效电路见右图：

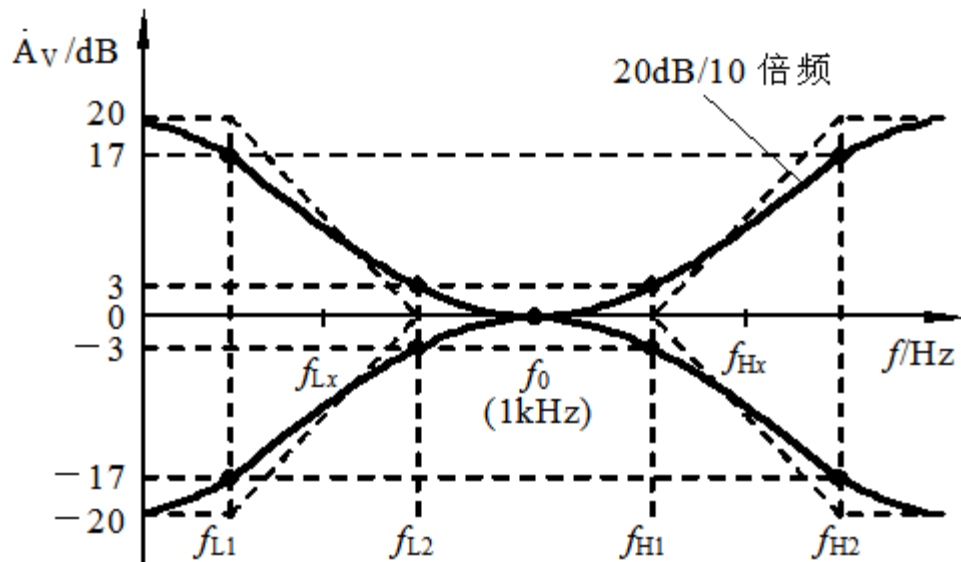


实际应用中

通常先提出对低频区 f_{Lx} 处和高频区 f_{Hx} 处的提升量或衰减量 x (dB), 再根据下式求转折频率 f_{L2} (或 f_{L1}) 和 f_{H1} (或 f_{H2}), 即

$$f_{L2} = f_{Lx} \cdot 2^{x/6}$$

$$f_{H1} = f_{Hx} / 2^{x/6}$$



4.功率放大器

功率放大器(简称功放)的作用是给音响放大器的负载 R_L (扬声器)提供一定的输出功率。当负载一定时,希望:

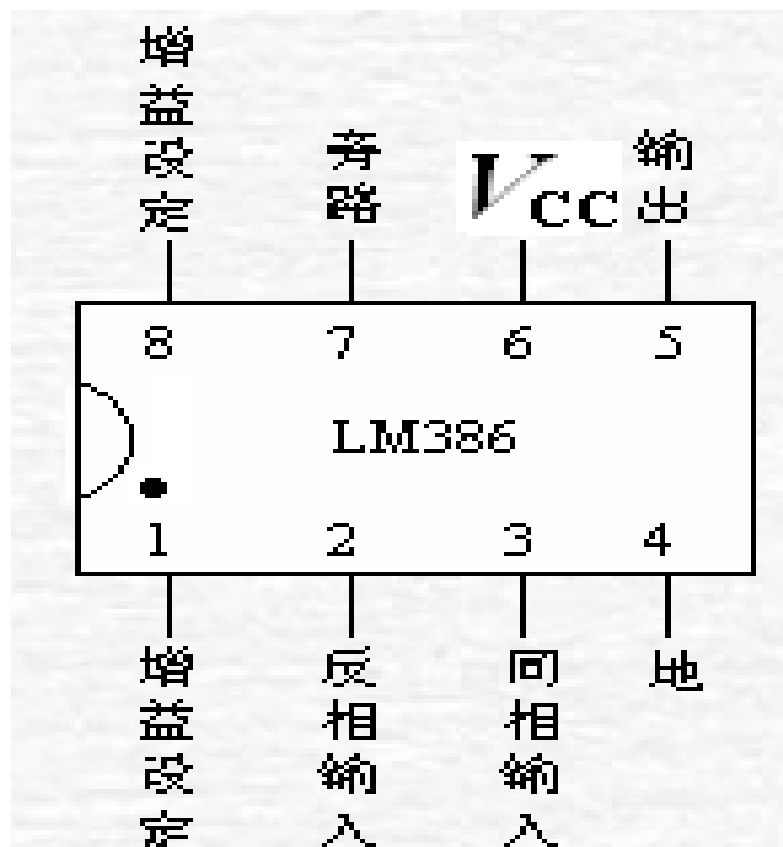
- 输出的功率尽可能大
- 输出信号的非线性失真尽可能地小
- 效率尽可能高

LM386集成功率放大器

(1) LM386内部电路

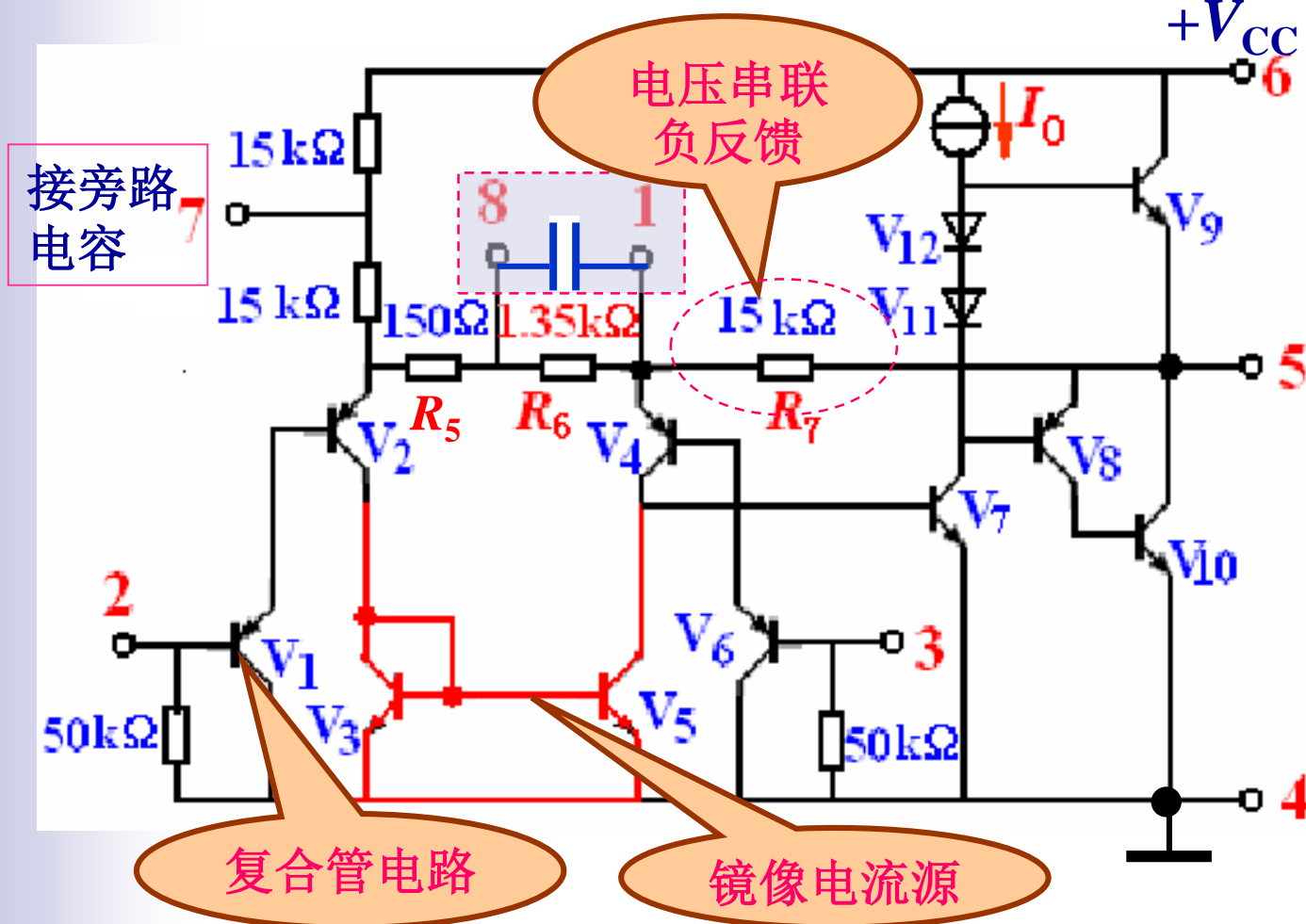
(2) 应用电路

(3) LM386N—4主要性能指标



LM386集成功率放大器

LM386是广泛用于收录音机、对讲机、电视伴音等系统中的低电压通用型低频集成功放。



$$A_{VF} \approx \frac{2R_7}{R_5 + R_6 // R}$$

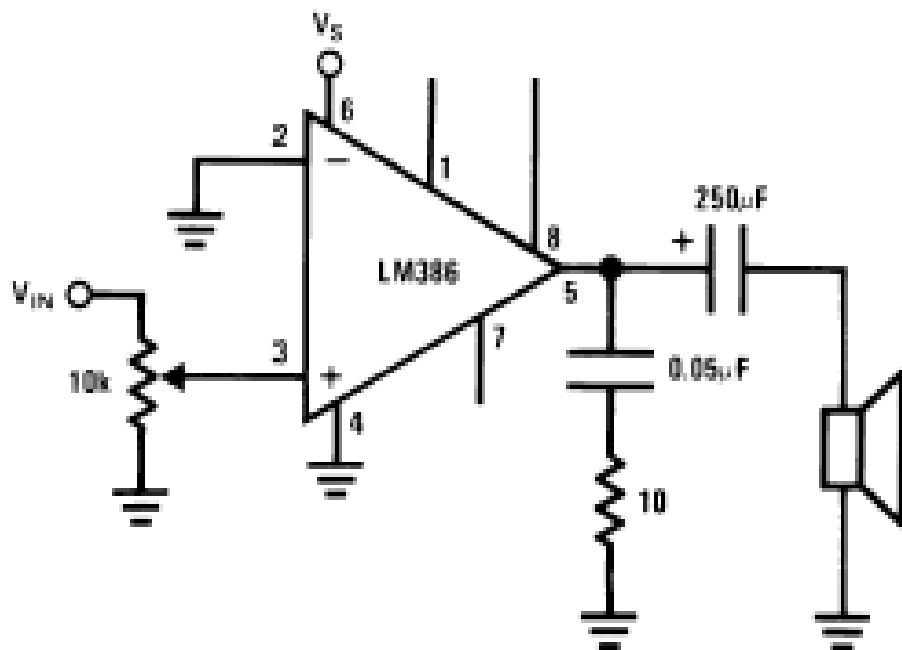
R为外接电阻。

1、8 开路时，
 $A_V = 20$
(负反馈最强)

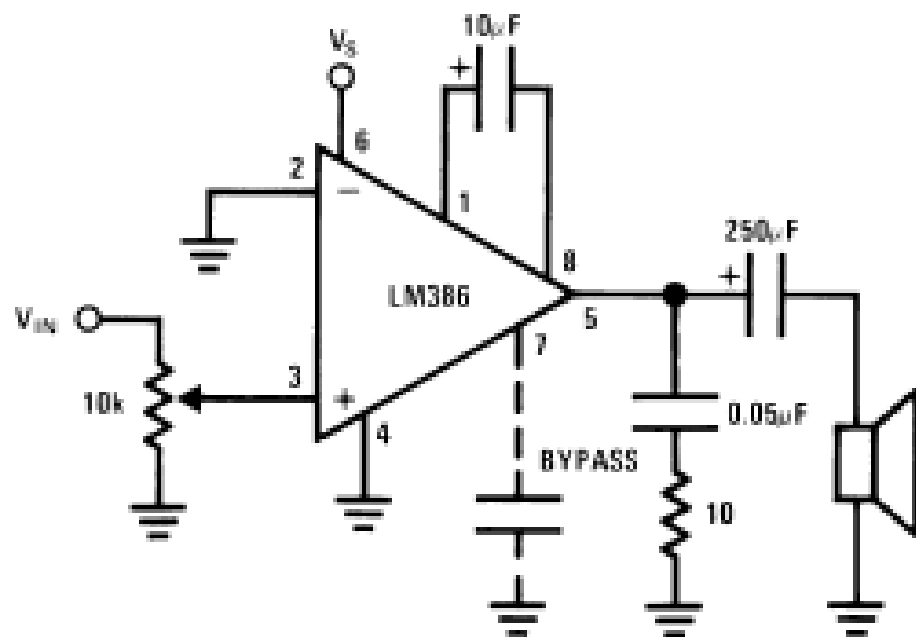
1、8 交流短路
 $A_V = 200$
(负反馈最弱)

(2) 应用电路

Amplifier with Gain = 20
Minimum Parts

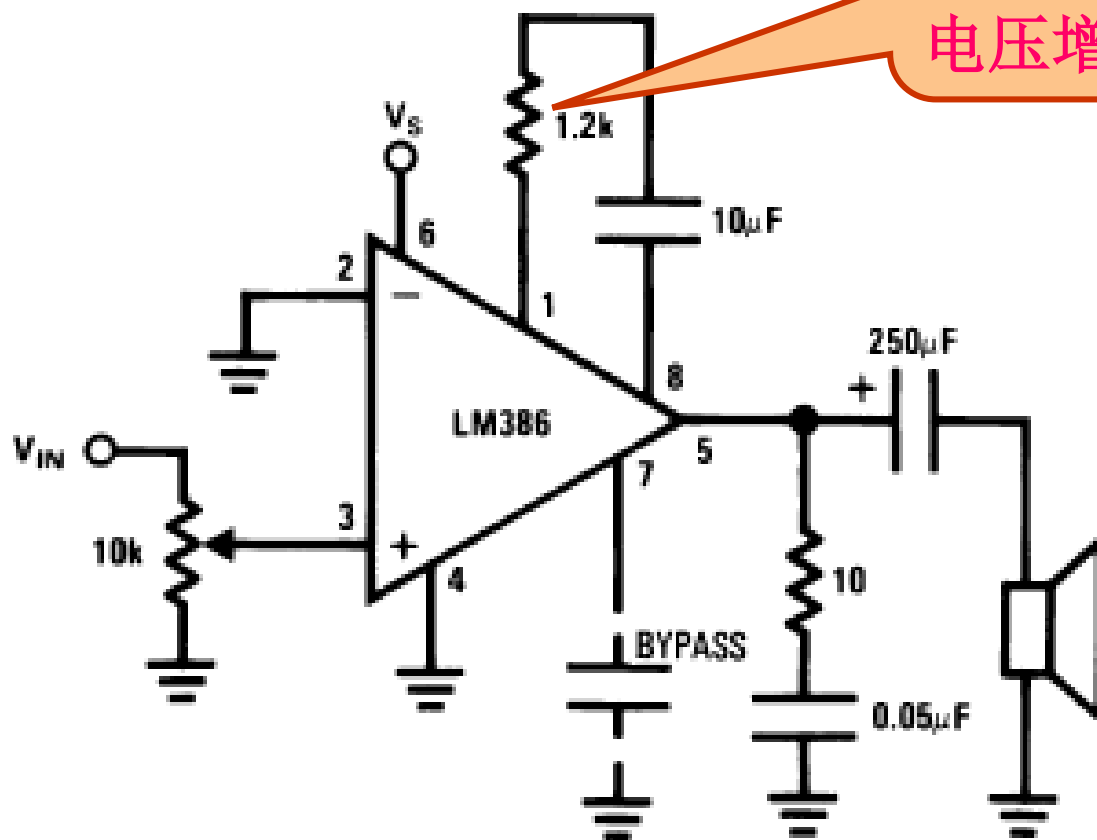


Amplifier with Gain = 200



(2) 应用电路

Amplifier with Gain = 50



换为电位器，
可以灵活调节
电压增益

(3) LM386N-4主要性能指标

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max
电源电压范围(V)		5		18
静态电源电流 I_Q	$V_{CC} = 6V, v_{IN} = 0$		4 mA	8
输出功率(P_{OUT})	$V_{CC} = 16V, R_L = 32\Omega$, THD = 10%	700 mW	1000mW	
电压增益(A_V)	$V_{CC} = 6V, f = 1\text{ kHz}$ 10 μF from Pin 1 to 8		26 dB 46 dB	
频带宽(BW)	$V_{CC} = 6V$, Pins 1 and 8 Open		300 kHz	
输入阻抗(R_{IN})			50 $k\Omega$	

三、设计举例

□ 例：设计一音响放大器，要求具有音调输出控制、卡拉OK伴唱，对话筒与录音机的输出信号进行扩音。

□ 已知条件：

- $+V_{CC} = +9V$ (单电源)
- 话筒(低阻 20Ω)的输出电压为 $5mV$
- 录音机的输出信号电压为 $100mV$
- 集成功放LM386 1只
- $8\Omega/2W$ 负载电阻 R_L 1只
- $8\Omega/4W$ 扬声器1只
- 集成运放NE5532 1只

主要技术指标

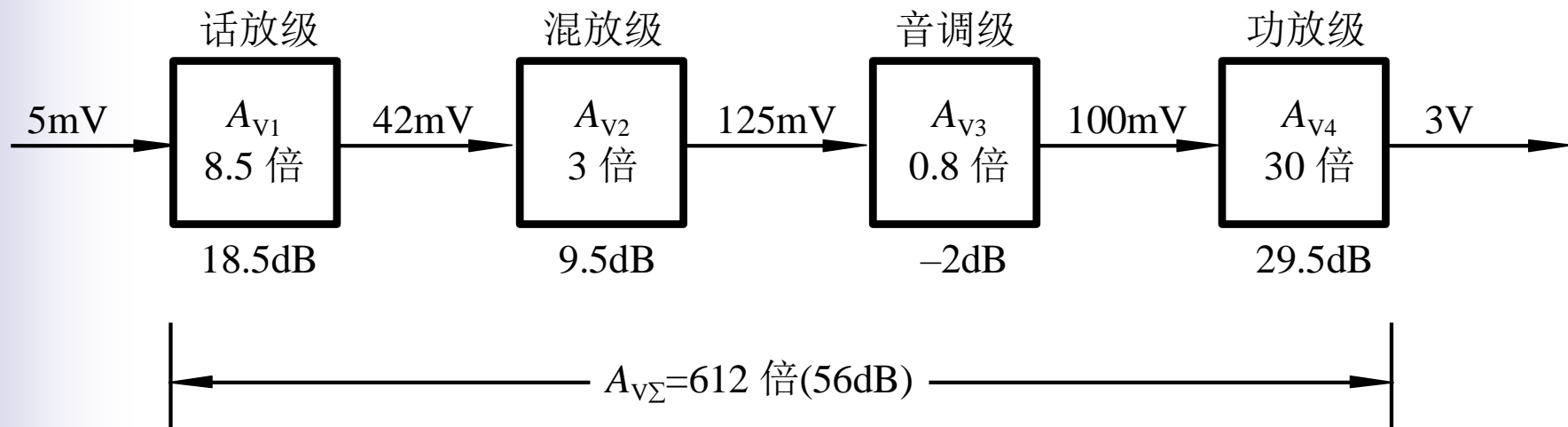
- 额定功率： $P_o \geq 0.7W (\gamma < 3\%)$;
- 负载阻抗： $R_L = 8\Omega$;
- 截止频率： $f_L = 40\text{Hz}$, $f_H = 10\text{kHz}$;
- 音调控制特性： 1kHz处增益为0dB，
100Hz和10kHz处有 $\pm 12\text{dB}$ 的调节范围，
 $A_{VL} = A_{VH} \geq 20\text{dB}$;
- 话放级输入灵敏度： 5mV;
- 输入阻抗： $R_i \gg 20\Omega$ 。

设计过程 (1)

- 确定整机电路的级数
- 根据各级的功能及技术指标要求分配电压增益
- 分别计算各级电路参数，通常从后向前级逐级计算
- 根据技术指标要求

音响放大器输入为5mV时， $P_o > 0.7W$ ，则输出电压 $V_o > 2.4V$ 。

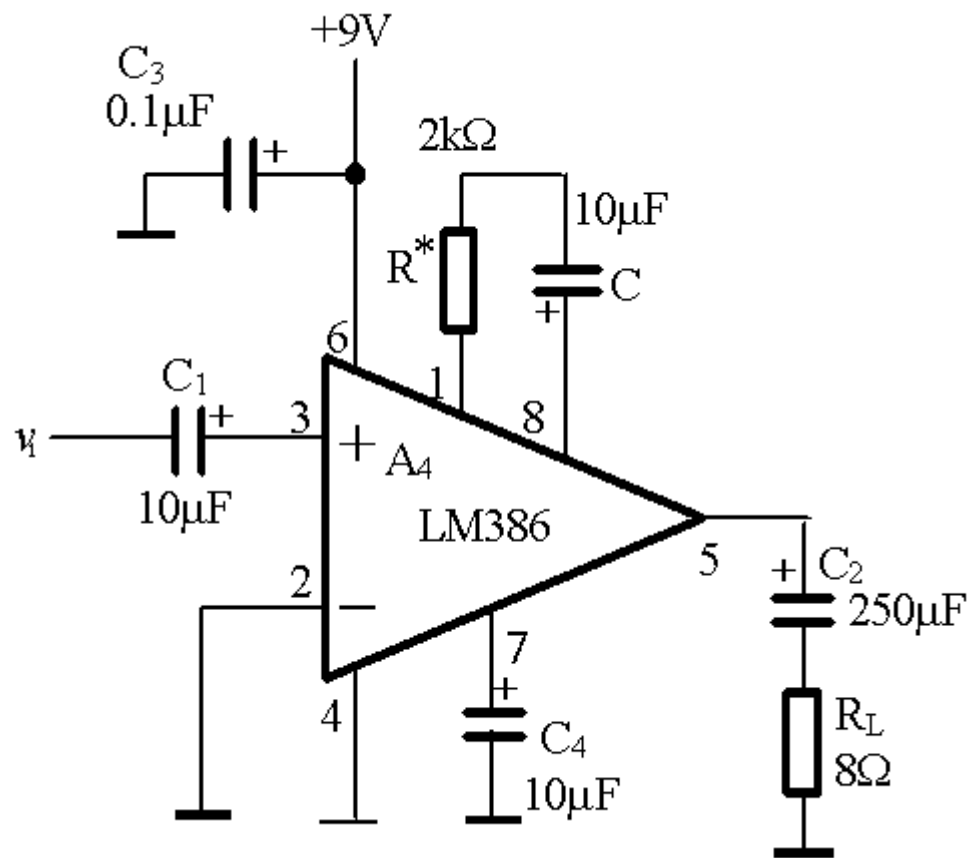
总电压增益 $A_{V\Sigma} = V_o / V_i > 480$ 倍 (54dB)。



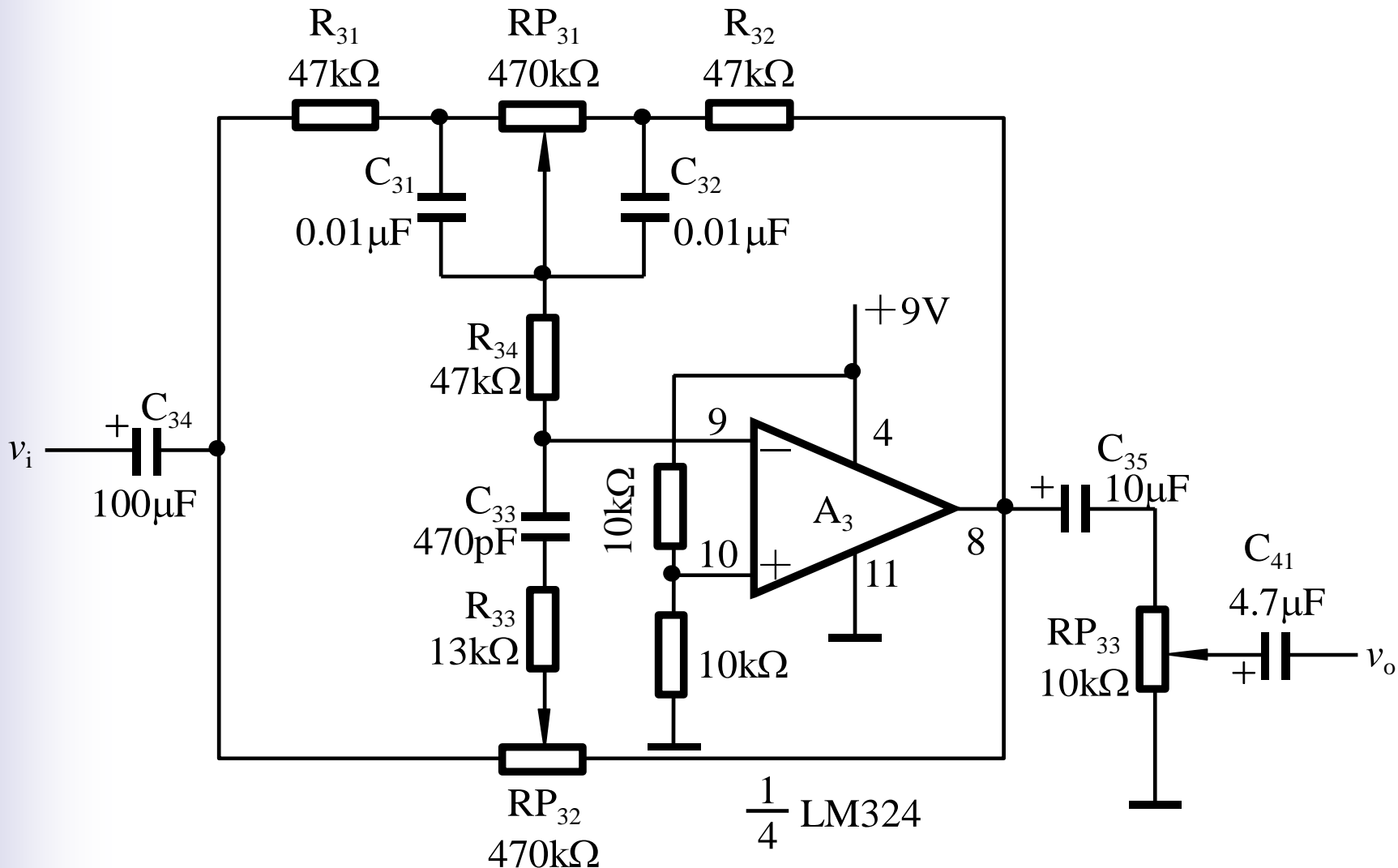
功率放大器设计

功放级的电压增益：

$$A_{V4} \approx \frac{2R_7}{R_5 + R_6 // R} = 31.2$$



音调控制器(含音量控制)设计 (1)



音调控制器(含音量控制)设计 (2)

- 已知 $f_{Lx}=100\text{Hz}$, $f_{Hx}=10\text{kHz}$, $x=12\text{dB}$ 。
- 由式(4.7.16)、(4.7.17)得到转折频率 f_{L2} 及 f_{H1} ;
 - $f_{L2} = f_{Lx} * 2^{x/6} = 400\text{Hz}$, $f_{L1} = f_{L2}/10 = 40\text{Hz}$;
 - $f_{H1} = f_{Hx} / 2^{x/6} = 2.5\text{kHz}$, $f_{H2} = 10f_{H1} = 25\text{kHz}$ 。

由式(4.7.5)得 $A_{VL} = (RP_{31} + R_{32})/R_{31} \geq 20\text{dB}$ 。其中, R_{31} 、 R_{32} 、 RP_{31} 一般取几千欧姆至几百千欧姆。现取 $RP_{31} = 470\text{k}\Omega$, $R_{31} = R_{32} = 47\text{k}\Omega$, 则

$$A_{VL} = (RP_{31} + R_{32})/R_{31} = 11(20.8\text{dB})$$

音调控制器(含音量控制)设计 (3)

由式(4.7.3)得

$$C_{32} = \frac{1}{2\pi R P_{31} f_{L1}} = 0.008\mu F$$

取标称值 $0.01\mu F$, 即 $C_{31}=C_{32}=0.01\mu F$ 。

由式(4.7.9)得

$$R_{34}=R_{31}=R_{32}=47k\Omega, \text{ 则 } R_a=3R_4=141k\Omega$$

音调控制器(含音量控制)设计 (4)

由式(4.7.15)得

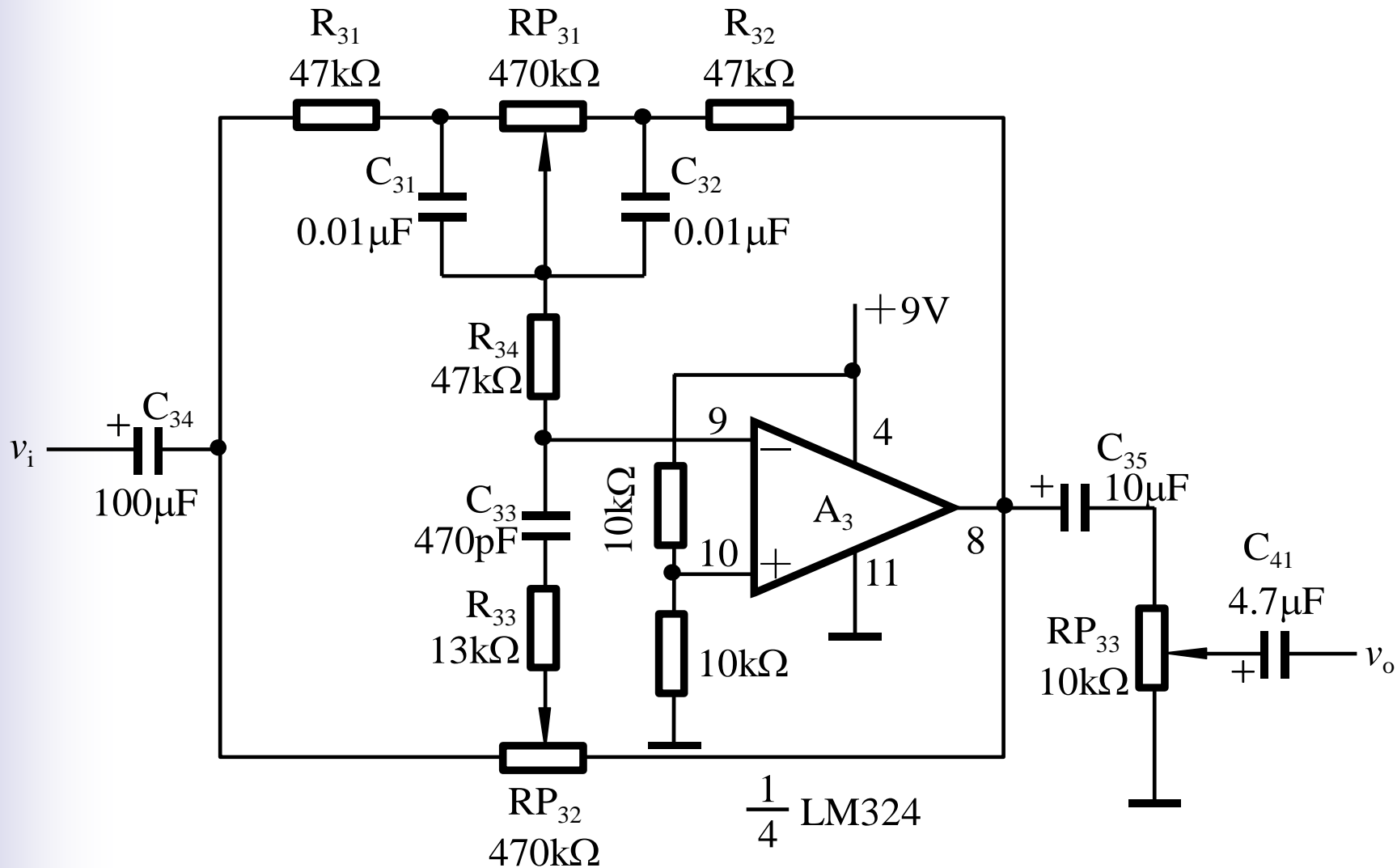
$$R_{33} = R_a / 10 = 14.1 \text{k}\Omega \quad \text{取标称值} 13 \text{k}\Omega$$

由式(4.7.12)得

$$C_{33} = \frac{1}{2\pi R_{33} f_{H2}} = 490 \text{pF} \quad \text{取标称值} 470 \text{pF}$$

取 $RP_{32} = RP_{31} = 470 \text{k}\Omega$, $RP_{33} = 10 \text{k}\Omega$, 级间耦合与隔直电容 $C_{34} = C_{35} = 10 \mu\text{F}$ 。

音调控制器(含音量控制)设计

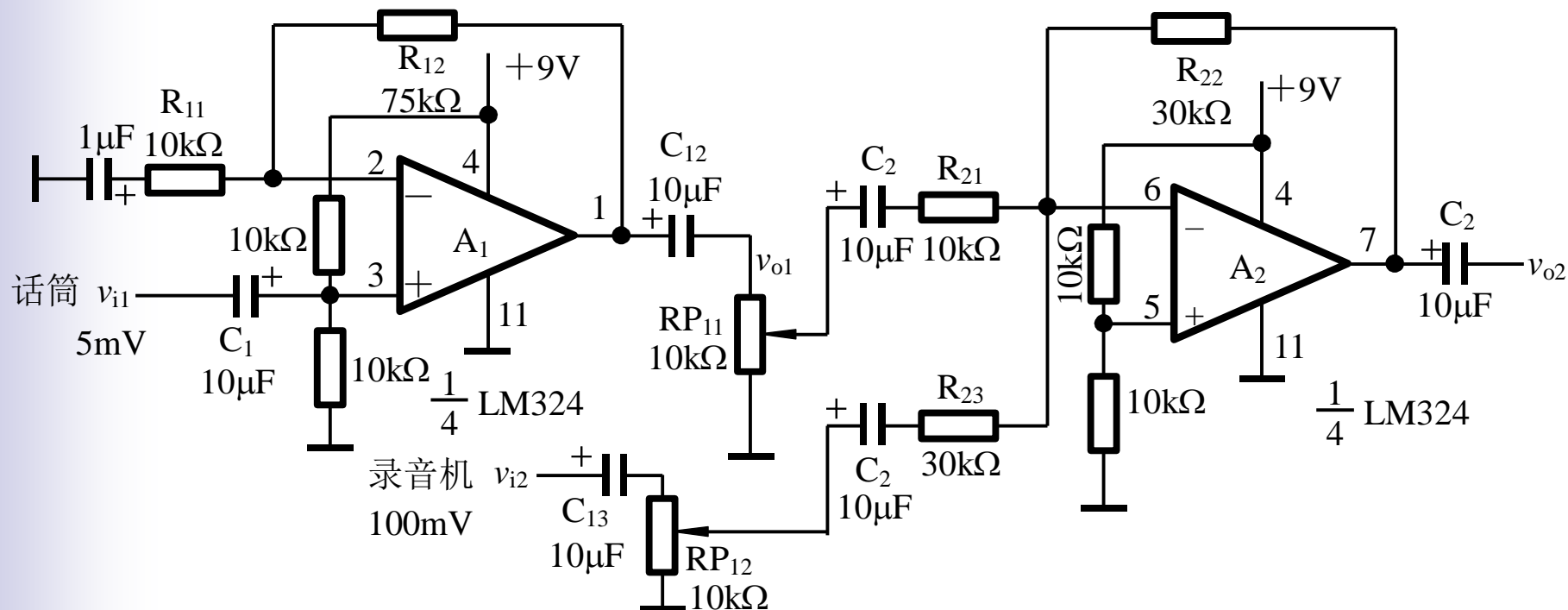


话音放大器与混合前置放大器

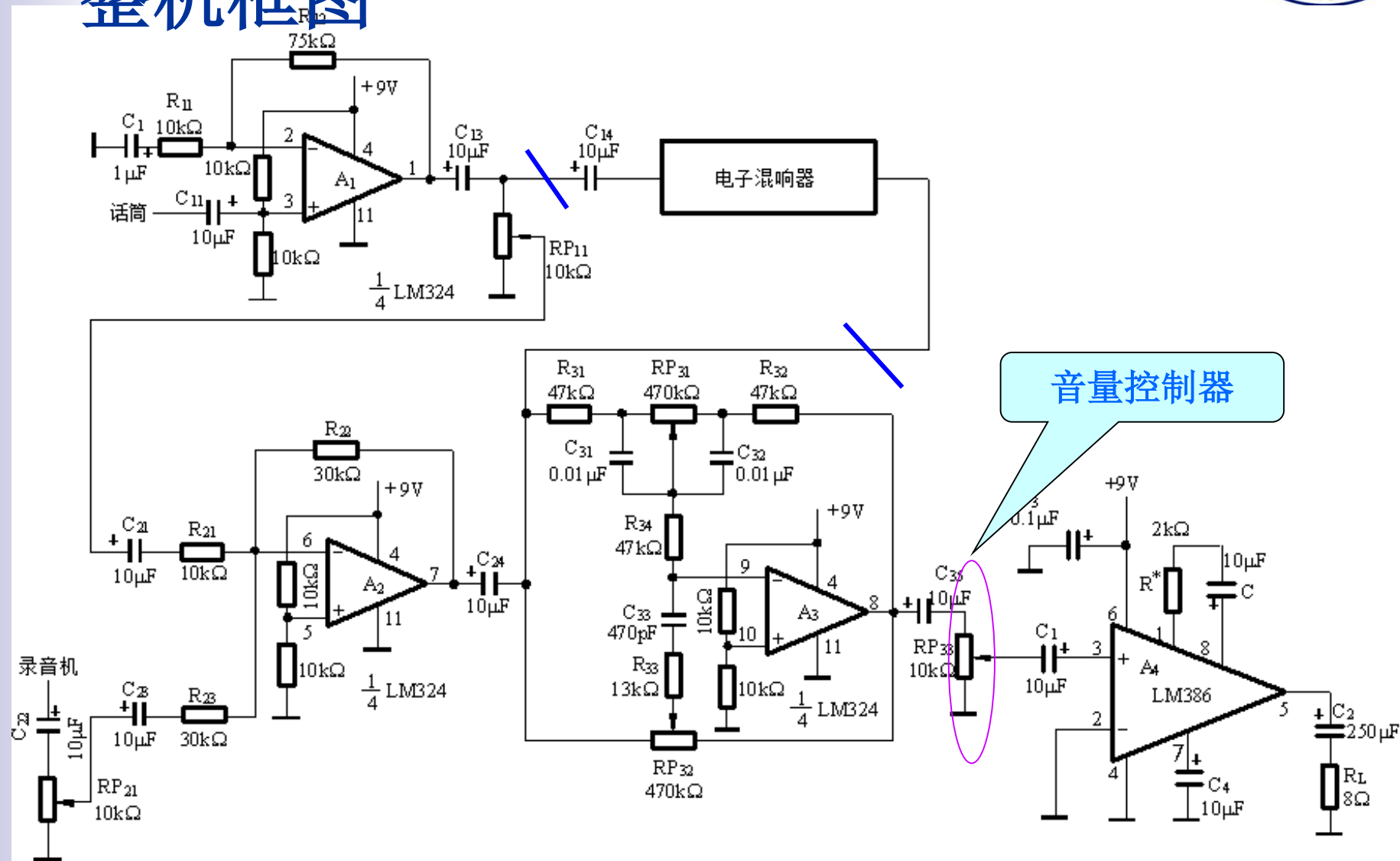
设计中电路由话音放大与混合前置放大电路组成。

A_1 组成同相放大器，其放大倍数

$$A_{V1} = 1 + R_{12} / R_{11} = 8.5(18.5\text{dB})$$



整机框图



四.电路安装与调试技术

(1) 合理布局，分级装调

- 音响放大器是一个小型电路系统，安装前要对整机线路进行合理布局
- 一般按照电路的顺序一级一级地布线
- 功放级应远离输入级
- 每一级的地线尽量接在一起
- 连线尽可能短，否则很容易产生自激。

(1) 合理布局，分级装调

- 安装前应检查元器件的质量
- 安装时特别要注意功放块、运算放大器、电解电容等主要器件的引脚和极性，不能接错
- 从输入级开始向后级安装，也可以从功放级开始向前逐级安装。
- 安装一级调试一级，安装两级要进行级联调试，直到整机安装与调试完成。

(2) 电路调试技术

□ 电路的调试过程一般是先**分级调试**，再**级联调试**，最后进行**整机调试与性能指标测试**。

□ 分级调试又分为**静态调试与动态调试**。

静态调试时，将输入端对地短路，用万用表测该级输出端对地的直流电压。话放、混放、音调电路均由运放组成，若运放是**单电源供电**，其静态输出直流电压均为 $V_{CC}/2$ ，功放级的输出(OTL电路)也为 $V_{CC}/2$ ，且输出电容 C_C 两端充电电压也应为 $V_{CC}/2$ 。若是**双电源供电**，直流电压均为0。

(2) 电路调试技术

动态调试是指**输入端接入规定的信号**，用示波器观测该级输出波形，并**测量各项性能指标**是否满足题目要求，如果相差很大，应检查电路是否接错，元器件数值是否合乎要求，否则是会出现很大偏差的。

(2) 电路调试技术

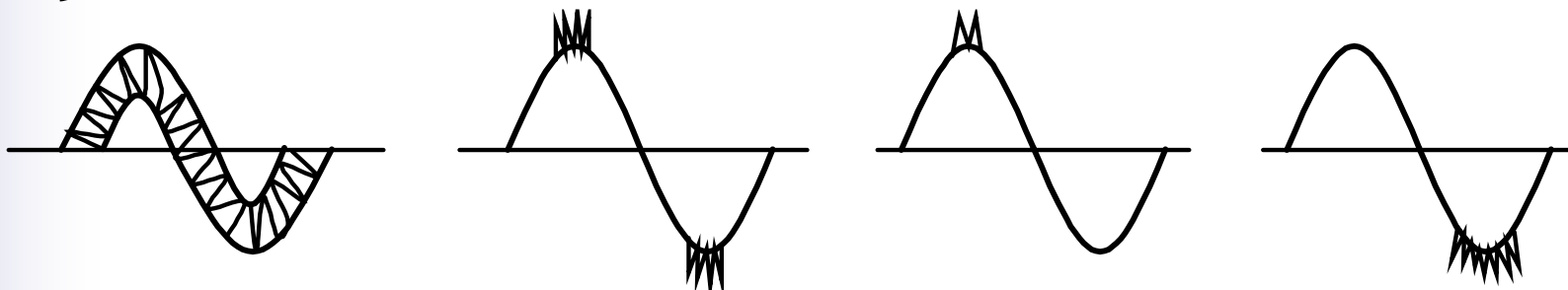
单级电路调试时的技术指标较容易达到，但级联后级间相互影响，可能使单级的技术指标发生很大变化，甚至两级不能进行级联。产生的主要原因：

一是布线不太合理，形成级间交叉耦合，应考虑重新布线；

二是级联后各级电流都要流经电源内阻，内阻压降对某一级可能形成正反馈，应接RC去耦滤波电路。R一般取几十欧姆，C一般用几百微法大电容与 $0.1\mu\text{F}$ 小电容相并联。

(2) 电路调试技术

由于功放输出信号较大，易对前级产生影响，引起自激。集成块内部电路多极点引起的正反馈易产生高频自激，常见高频自激现象如图所示。



可以加强外部电路的负反馈予以抵消，如功放级①脚与⑤之间接入几百皮法的电容，形成电压并联负反馈，可消除叠加的高频毛刺。

(2) 电路调试技术

- 常见的低频自激现象是电源电流表有规则地左右摆动，或输出波形上下抖动。
- 产生的主要原因是输出信号通过电源及地线产生了正反馈。可以通过接入RC去耦滤波电路消除。
- 为满足整机电路指标要求，可以适当修改单元电路的技术指标。图4.7.19为设计举例整机实验电路图，与单元电路设计值相比较，有些参数进行了较大的修改。

(2) 电路调试技术

用 $8\Omega/4W$ 的扬声器代替负载电阻 R_L ，可进行以下功能试听：

- **话音扩音：**将低阻话筒接话音放大器的输入端。应注意，扬声器输出的方向与话筒输入的方向相反，否则扬声器的输出声音经话筒输入后，会产生自激啸叫。讲话时，扬声器传出的声音应清晰，改变音量电位器，可控制声音大小。
- **音乐欣赏：**将录音机输出的音乐信号，接入混合前置放大器，改变音调控制级的高低音调控制电位器，扬声器的输出音调发生明显变化。

(2) 电路调试技术

用 $8\Omega/4W$ 的扬声器代替负载电阻 R_L ，可进行以下功能试听：

- **卡拉OK伴唱：**录音机输出卡拉OK磁带歌曲，手握话筒伴随歌曲歌唱，适当控制话音放大器与录音机输出的音量电位器，可以控制歌唱音量与音乐音量之间的比例，调节混响延时时间可修饰、改善唱歌的声音。

五. 音响放大器主要技术指标及测试方法

额定功率

音响放大器输出失真度小于某一数值(如 $\gamma < 5\%$)时的最大功率称为**额定功率**。其表达式为:

$$P_o = V_o^2 / R_L$$

式中, R_L 为**额定负载阻抗**; V_o (有效值)为 R_L 两端的**最大不失真电压**。 V_o 常用来选定电源电压 V_{cc} $V_{cc} \geq 2\sqrt{2}V_o$

额定功率

测量 P_o 的条件如下:

- 音响放大器的输入信号为频率 $f_i=1\text{kHz}$, 电压 $V_i=5\text{mV}$ 的正弦波。
- 音调控制器的两个电位器 RP_{31} 、 RP_{32} 置于中间位置, 音量控制电位器 RP_{33} 置于最大值。
- 用双踪示波器观测 V_i 及 V_o 的波形, 用示波器监测 V_o 的波形失真。

额定功率

测量 P_o 的步骤是：

- 功率放大器的输出端接额定负载电阻 R_L (代替扬声器)。
- 逐渐增大输入电压 V_i ，直到 V_o 的波形刚好不出现削波失真，此时对应的输出电压为最大输出电压。
- 由式4.7.22即可算出额定功率 P_o 。

注意：在最大输出电压测量完成后应迅速减小 V_i ，否则容易损坏功率放大器。

- 整机效率

$$\eta = P_o / P_C \times 100\%$$

式中， P_o 为输出的额定功率； P_C 为输出额定功率时所消耗的电源功率。

整机频率响应

- 整机放大电路的电压增益相对于中音频 f_0 (1kHz) 的电压增益下降3dB时对应低音频截止频率 f_L 和高音频截止频率 f_H ，称 $f_L \sim f_H$ 为整机电路的**频带**。
- 测量条件同额定功率，调节 RP_{33} 使输出电压约为最大输出电压的50%。

整机频率响应

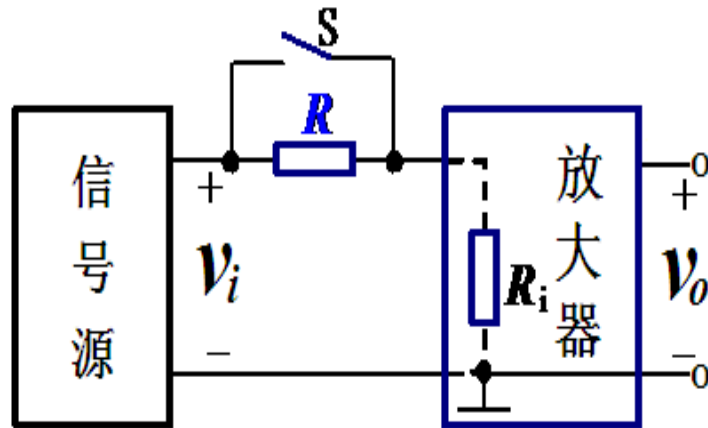
测量步骤是：

- 音响放大器的输入端接 V_i (等于5mV), RP_{31} 和 RP_{32} 置于中间。
- 使信号发生器的输出频率 f_i 从20Hz至50kHz变化(保持 $V_i=5mV$ 不变)。
- 测出负载电阻 R_L 上对应的输出电压 V_o , 可得到 f_L 与 f_H 的值。

输入阻抗

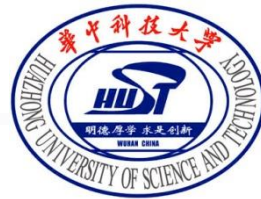
- 将从音响放大器输入端(话音放大器输入端)看进去的阻抗称为**输入阻抗 R_i** 。

输入阻抗



图中R取值尽量与 R_i 接近，用示波器的一个通道始终监视 v_i 波形，另一个通道先后测量开关S闭合和断开时对应的输出电压 v_{o1} 和 v_{o2} ，则输入电阻为：

$$R_i = \frac{v_{o2}}{v_{o1} - v_{o2}} \cdot R$$



音调控制特性

输入信号 v_i (**100mV**) 从音调控制级输入端的耦合电容加入，输出信号 v_o 从输出端的耦合电容引出。分别测低音频提升-高音频衰减和低音频衰减-高音频提升这两条曲线。

测试方法：音调控制特性

- 将 RP_{31} 的滑臂置于最左端（低音频提升），将 RP_{32} 的滑臂置于最右端（高音频衰减），频率从20Hz至50kHz变化，记下对应电压增益。
- 将 RP_{31} 的滑臂置于最右端（低音频衰减），将 RP_{32} 的滑臂置于最左端（高音频提升），频率从20Hz至50kHz变化，记下对应电压增益。

最后绘制音调控制特性曲线，并标注与 f_{L1} 、 f_{Lx} 、 f_{L2} 、 $f_0(1\text{kHz})$ 、 f_{H1} 、 f_{Hx} 、 f_{H2} 等频率对应的电压增益。

[illegible]

八.设计任务 P143

■ 功能要求:

- ☐ 具有话音放大、音调控制、音量控制等、卡拉OK伴唱等功能

■ 已知条件:

- ☐ 集成功放LM386
- ☐ 高阻话筒 $20k\Omega$ ，输出信号5mV
- ☐ 集成功放NE5532
- ☐ $10\Omega/2W$ 负载电阻1只
- ☐ $8\Omega/4W$ 扬声器1只
- ☐ 音源 (MP3 or PC)
- ☐ 电源电压 $\pm 9V$ (双电源)

■ 技术指标要求:

- 额定功率: $P_o \geq 0.3W$ ($\gamma < 3\%$)
- 负载阻抗: $R_L = 10\Omega$
- 频率响应: $f_L = 50Hz$, $f_H = 20kHz$
- 输入阻抗: $R_i \gg 20k\Omega$
- 音调控制特性: 1kHz处增益为0dB、125Hz和8kHz处有 $\pm 12dB$ 的调节范围,
 $A_{VL} = A_{VH} \geq 20dB$, 输入灵敏度5mV。

■ 测量内容

- 测量音调控制特性，填入表4.7.4，并绘制音调控制特性曲线
- 测量频率为1kHz时的输出功率 P_o 及整机电压增益 A_v ，绘制1kHz时的整机输入输出波形
- 输入阻抗 R_i
- 输出效率

■ 绘制波形

- 1kHz时的各级输入输出波形、整机输入输出波形
- 测试 R_i 时的 V_s 和 V_i 波形
- 整机幅频特性曲线
- 音调控制特性曲线

验收要求

- 预习报告（含设计电路_具体计算过程与电路参数）
- 实际测试数据---验收表；
- 实际电路与测量
- **MOOC**《电子线路设计、测试与实验（一）》单元测验八结果。
- *选作实验报告与结果