



创建世界高水平大学项目资助教材

陈孝桢
戚海峰

张丽敏
王育昕

编

模拟电路 实验

Analog Electronic Circuits Experiment

南京大学出版社



创建世界高水平大学项目资助教材

模拟电路 实验

Analog Electronic
Circuits Experiment

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路实验/陈孝桢编写. —南京: 南京大学出版社, 2005. 1

“985”创建世界高水平大学教材

ISBN 7-305-04409-1

I. 模... II. 陈... III. 模拟电路-实验-高等学校-教材 IV. TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 141250 号

书 名 模拟电路实验
编 著 者 陈孝桢 张丽敏 戚海峰 王育昕
出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
电 话 025-83596923 025-83592317 传真 025-83328362
网 址 <http://press.nju.edu.cn>
电子邮件 nupress1@public1.ptt.js.cn
sales@press.nju.edu.cn (销售部)
印 刷 南京大众新科技印刷有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 20.625 字数 358 千
版 次 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷
印 数 1-3 000
ISBN 7-305-04409-1/O·306
定 价 34.00 元

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书
销售部门联系调换

前 言

模拟电路实验是南京大学电子科学与工程系一门重要的基础实验课。近几年来,我一直在思考,面对电子科学与技术日新月异的进步,在整个教学计划中,模拟电路实验的教学目的是什么?希望通过这门实验课教学,使学生学到些什么?应该做哪些实验?

我以为,电子科学与工程学科本科的教学目的,是使学生毕业后能从事现代电子设备的使用、维护和设计研究工作,为学生在电子科学与工程方面进一步深造或自学打下宽实的基础。也就是说,他们最终都要面对实际的电子系统。学生在做模拟电路实验之前,在课堂教学中学到的模拟电路知识通常是基于理想元件的基本单元电路的理论知识。所以,通过模拟电路实验,要使学生认识实际元件,分析实际电路,学习使用当代的常用电子测量仪器,学习使用电路分析与设计软件,了解现代电子系统的组成和特点。因此,模拟电路实验是模拟电路课堂理论教学的继续和深入。

根据上述认识,选取教学内容。模拟电路实验作为电子技术基础实验,仍然以对传统典型电路做验证性实验为主,因为它们是电子科学与技术基础的重要组成部分。但它与实验结果相验证不是基于理想元件的电路分析得到的结果,而是计及实际元件参数的电路分析结果。在此基础上适当增加了一些新的内容,使得本实验教材对教学内容、教学要求做了较大的更新,特别突出下列三方面的要求:

1. 强调计及实际元件参数,对电路做精密分析。强调用信号与系统的理论分析线性电路,强调用计算机软件做电路仿真,在此基础上对电路做验证性实验。
2. 强调用好数字式仪器。不仅要求学生会动手操作,而且还要求知道最基本的仪器构成及其基本工作原理。因为只有了解仪器的构成与基本原理,才能真正用好仪器。要求学生知道数字式仪器与计算机构成测量系统的工

作原理与使用操作方法,这可使其了解现代电子系统的设计思想和基本组成。

3. 强调阅读英文资料. 因为,大量电子科学与技术的原创性资料是用英文书写的,只有真正能通过阅读英文资料获得具体的知识,才能更快、更准确地获取其所载有的信息。

具体做法是:例如,在实验1中,对三极管射极偏置放大器的静态计算,若三极管 β 值较小,在计算基极电压时必须计及基极电流;在实验2中,要求计算有级间电压串联负反馈的放大器的输入电阻;在实验3中,要求比较差动放大器输入端对地接 $510\ \Omega$ 电阻与否对差动放大器性能的影响;在实验4中,要求能够读懂集成功放数据手册;在实验5中,要求推导差动放大器的共模放大倍数,读懂运放数据手册;在实验6中,要求计及运放的频率特性分析积分电路和微分电路等等. 实验结果与上述分析计算结果的一致性,比实验结果与基于理想元件的电路分析计算结果的一致性,有明显的提高。

共有13个实验. 其中,前11个实验基本上是验证性实验,实验12是设计性实验,实验13是综合性实验. 对于本校电子系的学生,每周一次实验课,每次4学时,16周,共计64学时. 绪论、仪器使用和EWB软件使用各用4学时,前11个实验各用4学时,实验12用8学时,均要求做完全部实验. 实验13可编程放大器实验,“GPIB板的安装与使用初步”作为开放实验,供学生选做. 对于非电子系的学生,实验个数可适当减少,每个实验的实验内容也可适当减少。

本实验教材由陈孝桢选编. 其中,实验13由张丽敏编写,“GPIB板的安装与使用初步”由戚海峰编写,王育昕编写了部分初稿,其余由陈孝桢编写,张丽敏对教材做了最后的文字校对。

本实验教材是在不断思考、研究、教学相长的过程中形成的. 我认为,这样的过程仍然在继续中. 真诚地希望所有使用本教材的教师和学生,对本教材提出改进意见,对本教材中不正确的地方给予指正。

陈孝桢

2004年12月

目 录

绪 论	1
-----------	---

第 1 章 实 验

1.1 单级放大电路实验	23
1.2 负反馈放大电路实验	30
1.3 差动放大电路实验	36
1.4 集成功率放大器实验	40
1.5 有源 RC 电压放大电路实验	45
1.6 积分与微分电路实验	57
1.7 RC 波形发生电路实验	70
1.8 LC 正弦波振荡电路和选频放大电路实验	77
1.9 波形变换电路实验	82
1.10 有源 RC 滤波电路实验	90
1.11 直流稳压电源实验	99
1.12 低频小信号放大电路设计与制作实验	103
1.13 可编程放大器实验	104

第 2 章 电路的计算机仿真与印刷电路板设计

2.1 EWB 入门	133
2.2 Protel 入门	145

第 3 章 常用仪器简介

3.1 数字式示波器 Tektronix TDS1002 初步使用	170
---	-----

3.2	安捷伦函数信号发生器 Agilent 33120A 的性能与使用说明	193
3.3	FLUKE45 双显示多用表	211
3.4	GPIB 板的安装与使用	226

第4章 常用电子元件

4.1	电 阻	241
4.2	电容器	247
4.3	电感器	253
4.4	常用半导体分立元件型号的命名方法简介	256

附 录

1.	LF353	260
2.	OP07	277
3.	LM386	293
4.	AD7111/AD7111A	304

参考文献	323
------------	-----

绪 论

1. 关于模拟电路实验

学习和研究电子科学技术的最终目的之一是设计和制造各种各样的电子设备. 电子科学技术的内容可有以下不同的分类:

(1) 基础理论与工程技术;

(2) 硬件与软件;

硬件电路: 模拟电路、数字电路、计算机电路;

模拟电路: 低频电路、高频电路; 弱电电路、强电电路; 分立元件电路、集成电路; 微电子电路等等.

由于电子科学技术的发展, 对模拟电路人才的需求减少, 但要求越来越高.

小信号放大器仍然只能由模拟电路来实现. 功率放大器大多用模拟电路来实现. 模拟电路技术是微电子电路设计的主要技术之一.

在现代电路中, 通常包含模拟电路、数字电路和计算机电路, 完全由模拟电路构成的电子电路系统已越来越少. 模拟电路往往是电子系统中的一部分.

学习电路大致可分为三个环节: (1) 基本电路原理; (2) 单元电路设计与制作; (3) 电路系统设计与制造. 模拟电路的课堂教学所讲述的是模拟电路的基本电路原理. 本课程学习内容主要是通过对基本电路原理验证, 为单元电路设计与制作打基础. 另外, 还有一小部分是初步的、较简单的关于电路系统设计的内容.

模拟电路实验是学习过模拟电路理论课程后通过实验进一步深入学习模拟电路的一门课程, 是学习模拟电路不可缺少的环节.

2. 学习内容

(1) 应用已学习的基础知识,做验证性实验

在此过程中,应学会使用常用仪器,如示波器、信号源、多用表、毫伏表、直流稳压电源等,要知道读数的物理意义、物理量纲、精度等;学习使用常用的电路制图、仿真、分析、印刷电路板设计软件,如 EWB, Protel; 学习使用常用的电路实验、电路制作工具,如面包板、电烙铁。

(2) 阅读元件手册

在模拟电路教材中所示的元件大多为理想元件. 在电路设计中将选用适合的标称元件. 在实际电路制作中将遇到实际元件. 在模拟电路实验中 will 遇到实际元件. 从理想元件开始来认识标称元件、实际元件往往还需要学习很多知识.

例如,电阻. 在理想元件中,电阻只用一个参数来描述,即电阻值. 在标称元件中,至少要有以下描述: 材质、结构、额定功率、标称值与精度. 例如,材质: 碳膜电阻(价格低,元件参数较离散,热稳定性较差,噪声较大),金属膜电阻(价格较高,元件参数较准确,热稳定性较好,噪声较小),线绕电阻(价格高,元件参数较金属膜电阻更准确,有感)等等. 电阻结构有: 固定电阻,可变电阻,线绕电阻等等. 额定功率: 0.125 W, 0.25 W, 0.5 W, 1 W, 2 W 等等. 当消耗在电阻上的电功率超过电阻额定功率后,电阻将很快被升温烧毁. 标称值: 例如精度为 5% 的电阻,标称值为 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.4, 2.7, 3, 3.3, 3.6, 3.9, 4.3, 4.7, 5.1, 5.6, 6.2, 6.8, 7.5, 8.2, 9.1, 然后再乘 1, 10, 100, ... 在实际元件中,元件的实际电阻值通常与元件的标称电阻值有差别,此外至少还要有以下描述: 热稳定性,老化特性,元件的制造质量等.

又例如,运放. 理想运放至少有以下假设: 开环放大倍数无穷大、输入阻抗无穷大、共模抑制比无穷大、输入失调电压为零、输入失调电流为零、输出电阻为零. 而实际运放远不是这样. 实际运放种类繁多,本实验课程使用的运放有 LF353, OP07. 由 <http://www.2lic.com/> 可得到 LF353, OP07 的详细资料,见附录 1, 2. 由这两份资料可见,要设计一个性能良好的单级放大电路,必须充分了解运放的性能.

由于实际元件与理想元件之间的差异,对于同一个电路,实际电路的性能指标与电路原理课中基于理想元件的电路的性能有差别,有时这种差别可能还比较大. 因此,在分析实际电路时,必须计及元件的有关参数. 这样,

使得对实际电路的分析比对由理想元件组成电路的分析变得更加复杂,往往要涉及到更多的知识.由计及实际元件的性能参数,应用线性系统的理论分析实验电路得到的结果,往往与实际测量到的结果十分一致.这对设计精密电路是非常有益的.

(3) 应用已学知识分析未见过的电路

例如,在实验 4 中分析集成功放 LM386 内部的等效电路;在实验 9 中,分析利用二极管的非线性特性实现三角波—正弦波变换的原理;在实验 10 中分析四阶低通滤波器的幅频特性.

(4) 应用已学知识设计基本单元电路

例如,在实验 12 中,要求实验者设计小信号放大器.

3. 关于线性电路基本理论

在线性系统理论中,对系统最常用的数学描述有:传递函数、频率特性函数、微分方程、状态方程.图 1 所示框图是“用传递函数描述线性电路”最简单的形式,其中 $X_i(s)$ 为输入的 Laplace 变换, $H(s)$ 为电路的传递函数, $Y_o(s)$ 为输出的 Laplace 变换, $s = \sigma + j\omega$, 称为复频率;它们与时域函数有以下关系:

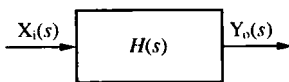


图 1 传递函数框图

$$X_i(s) = \int_{0^-}^{\infty} x_i(t) e^{-st} dt, \quad x_i(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} X_i(s) e^{st} ds; \quad (1)$$

$$H(s) = \int_{0^-}^{\infty} h(t) e^{-st} dt, \quad h(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} H(s) e^{st} ds; \quad (2)$$

$$Y_o(s) = \int_{0^-}^{\infty} y_o(t) e^{-st} dt, \quad y_o(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} Y_o(s) e^{st} ds. \quad (3)$$

其中 $h(t)$ 为系统的单位脉冲响应. 系统的输入与输出之间有如下关系:

$$Y_o(s) = H(s) \cdot X_i(s). \quad (4)$$

由此得到的响应包含了暂态响应和稳态响应. 在稳态, $s = j\omega$, 系统的输入与输出之间有如下关系

$$Y_o(j\omega) = H(j\omega) \cdot X_i(j\omega), \quad (5)$$

其中 $Y_o(j\omega)$ 是输出的 Fourier 变换, $X_i(j\omega)$ 是输入的 Fourier 变换, $H(j\omega)$ 是系统的频率特性函数.

正弦信号 $x(t) = A \sin \omega t$ 是稳态信号. 正弦信号通过线性电路可有以下叙述: 电路输出信号的幅值被电路幅频特性加权; 频率不变, 不会有新的频率出现; 由于电路是物理可实现系统, 电路的输出滞后于电路的输入. 用数学公式可表示为

$$y(t) = |H(j\omega)| \cdot A \sin[\omega t + \arg H(j\omega)], \quad (6)$$

其中 $|H(j\omega)|$ 是系统的幅频特性, $\arg H(j\omega)$ 是系统的相频特性.

在本实验课程中, 若不作特别说明, 都认为是线性电路.

4. 常遇到的问题举例

(1) 实际运放性能对放大器设计影响的若干问题举例(以 LF353 为例)

1) LF353 性能的简要说明

通常, 运放数据手册在开头都有如下类似的简要说明. 它只是供在选择运放时参考. 在具体设计电路时必须详细阅读具体的资料.

LF353 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier **General Description**

These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF353 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

Features

Internally trimmed offset voltage: 10 mV

Low input bias current: 50 pA.

Low input noise voltage: 25 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Wide gain bandwidth: 4 MHz .

High slew rate: $13 \text{ V}/\mu\text{s}$.

Low supply current: 3.6 mA .

High input impedance: $10^{12} \Omega$.

Low total harmonic distortion: $<0.02\%$, $A_v=10$, $R_L=10 \text{ k}\Omega$, $V_O=20 \text{ V}_{\text{p-p}}$, $\text{BW}=20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$.

Low $1/f$ noise corner: 50 Hz .

Fast settling time to 0.01% : $2 \mu\text{s}$.

2) 有限增益与相移对放大器的影响

例 1 利用运放设计一个放大倍数为 10, 频带宽度为 (0 Hz, 100 kHz) 的电压放大器.

选用 LF353. 为简化, 仅对其开环幅频特性和相频特性进行讨论. 假设其开环幅频特性和相频特性曲线如图 2 所示, 其中相频特性曲线是一种理想的实际运放的相频特性曲线. 放大器可如图 3 所示, 其框图如图 4 所示.

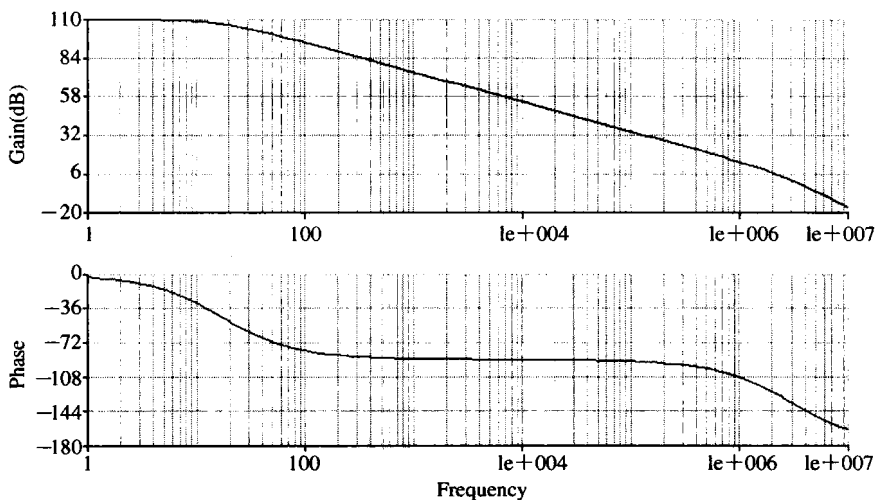


图 2 典型的 LF353 频率特性函数曲线

当输入为稳态正弦波时, 由图 4 可得放大器的放大倍数为

$$A_{v_o}(j\omega) = \frac{A_o(j\omega)}{1 + A_o(j\omega)F} \quad (7)$$

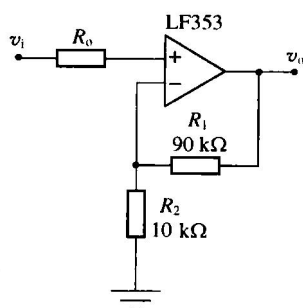


图3 同相输入放大器

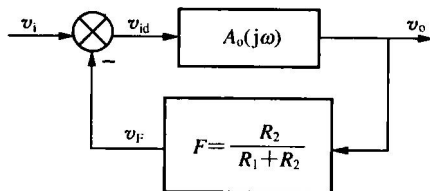


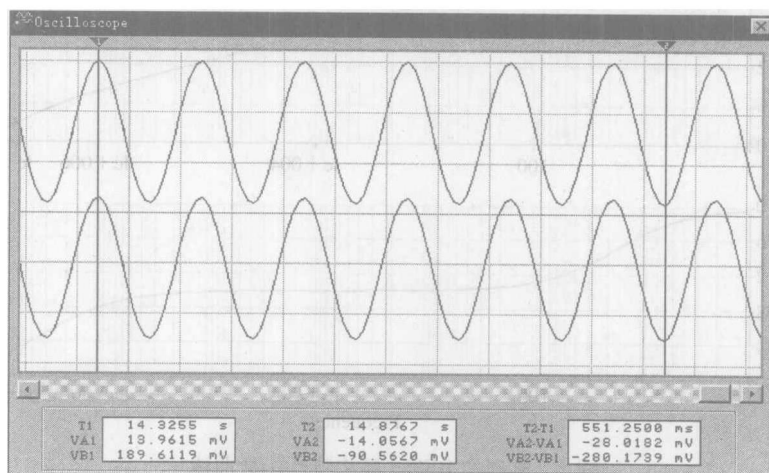
图4 同相输入放大器的数学模型

若输入信号频率很低,例如 $f = 10 \text{ Hz}$, $V_i = 10 \text{ mV}$,则由图2可知 $A_o = 3.16 \times 10^5$, $\varphi \approx 0^\circ$,由图4可知 $F = 0.1$,将它们代入(7)式可得

$$A_{v_o} = \frac{3.16 \times 10^5 \angle 0}{1 + 3.16 \times 10^5 \angle 0 \times 0.1} \approx 10. \quad (8)$$

这与运放为理想元件时得到的结果相同,用 EWB 模拟,其输入、输出波形如图5所示.所以,这时(7)式可简化为

$$A_{v_o} \approx \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 10. \quad (9)$$

图5 $f = 10 \text{ Hz}$, 放大器 EWB 模拟结果

这时把运放当作理想元件是适当的,这样可大大简化计算.最初研制运放的原因之一是为了对控制系统做校正,控制系统的固有频率往往是很低的.

当输入信号的频率并不很低时,若仍然把运放当作理想元件,那么,实际电路的情况将与由(9)式得到的结果不一样.例如,当 $f = 100 \text{ kHz}$, $V_i = 10 \text{ mV}$ (有效值)时,由图 2 可知, $A_o \approx 34.5$, $\varphi \approx -92^\circ$,由图 4 可知, $F = 0.1$, 将它们代入(7)式可得

$$A_{v_o} = \frac{34.5 \angle -92}{1 + 0.1 \times 35 \angle -92} = 9.57 \angle -16.1. \quad (10)$$

比较(9)(10)式可知,两者不一样.利用 EWB 做模拟分析的结果如图 6 所示.由图 6 可知,当 $f = 100 \text{ kHz}$ 时,放大器的放大倍数为 $273.7/2.828 = 9.68$,相移为 $\varphi = 360^\circ \times 425 \text{ ns}/10 \mu\text{s} = 15.3^\circ$.

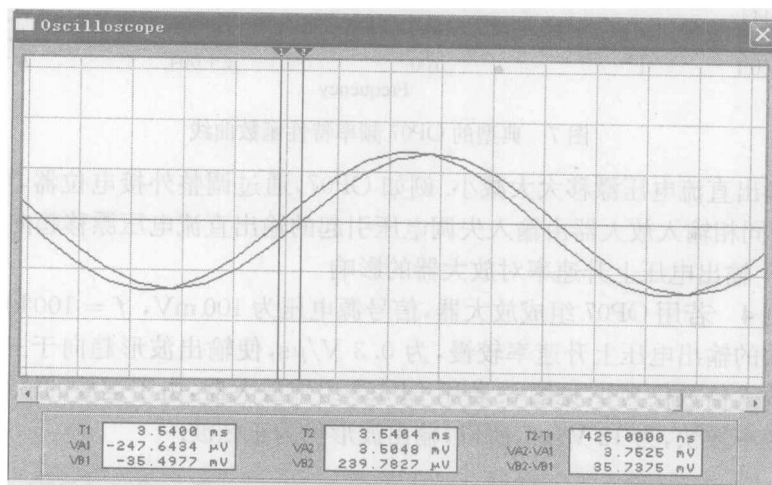


图 6 $f = 100 \text{ kHz}$, 放大器 EWB 模拟结果

例 2 OP07 的开环幅频特性曲线如图 7 所示,取 $f = 100 \text{ kHz}$ 时其开环增益约为 15 倍,相移为 -108° . 若用 OP07 代替 LF353,输入信号 $V_i = 10 \text{ mV}$ (有效值)、频率 $f = 100 \text{ kHz}$,则可以估算,输出幅值为 57 mV . 所以,若要做放大倍数为 10,频带宽度为 $(0 \text{ Hz}, 100 \text{ kHz})$ 的电压放大器,可选 LF353,而不可选 OP07.

3) 输入失调电压对放大器的影响

例 3 由于 LF353 的输入失调电压较大,典型值为 5 mV ,例 1 中的放大器放大倍数为 10,所以输出直流漂移电压约为 50 mV ;而 OP07 的输入失调电压较小,典型值为 $30 \mu\text{V}$,若例 1 中的放大器用 OP07,则放大器的输出直流电压漂移仅为 $300 \mu\text{V}$. 对于高增益直流放大器,输入直流电压失调,有可能造成输出直流电压限幅,使放大器不能正常工作.

在实际电路中,有的运放通过调整外接电位器,可使由输入失调电压引

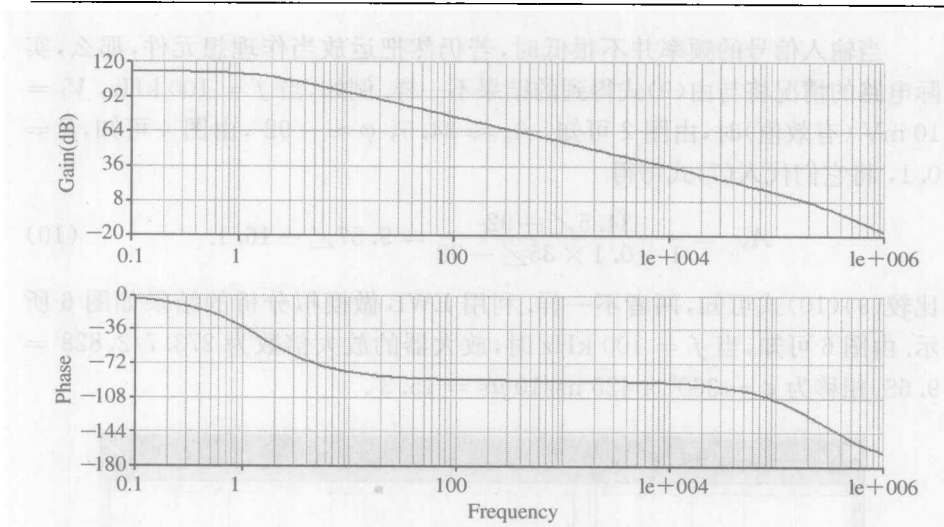


图 7 典型的 OP07 频率特性函数曲线

起的输出直流电压漂移大大减小。例如 OP07, 通过调整外接电位器, 可使图 3 所示同相输入放大器由输入失调电压引起的输出直流电压漂移趋向零。

4) 输出电压上升速率对放大器的影响

例 4 若用 OP07 组成放大器, 信号源电压为 100 mV , $f = 100\text{ kHz}$, 由于运放的输出电压上升速率较慢, 为 $0.3\text{ V}/\mu\text{s}$, 使输出波形趋向于三角波, 幅值放大倍数仅为 4, 见图 8。若用 LF353 组成放大器, 由于运放的输出电压上升速率较快, 为 $13\text{ V}/\mu\text{s}$, 所以, 输出波形仍为正弦波。

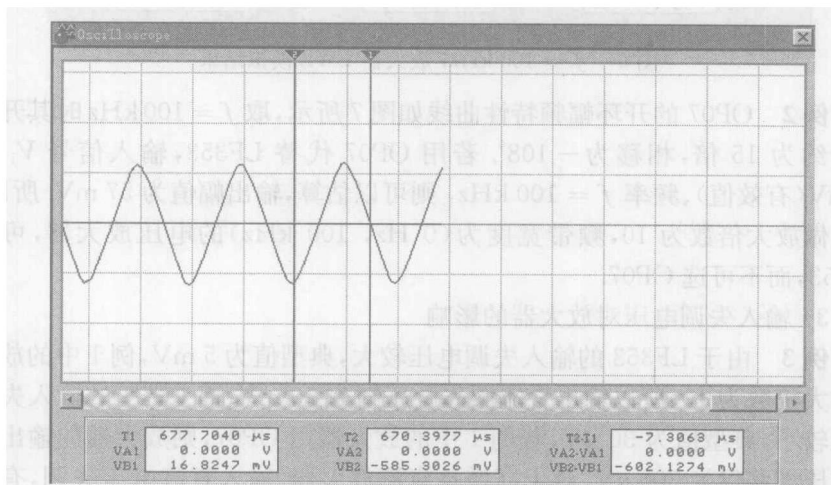


图 8 输出电压上升速率对放大器的影响示意图

5) 运放的负载特性

普通电压型运放的输出功率通常为几十毫瓦。当输出端负载过重,在电路通电后很短的时间内,电路输出波形将发生严重失真,若不及时断电,运放将被烧毁。这里负载指 V_o^2/R_L , 其中 V_o 为应输出电压有效值, R_L 为输出端负载电阻。

在运放说明书中所列出的运放性能指标在某些使用条件下都会对由其构成的电路的性能产生影响。由于这里仅仅是简介,所以仅举几例,这绝不是说仅仅只有以上几例。运放的特性很多,运放的型号也很多,必须根据电路的要求选择运放。

(2) 电路系统设计中的若干问题举例

1) 电源耦合对电路系统的影响

例 1 假设电路如图 9, 其中有一个小信号放大器和一个正弦波发生器,

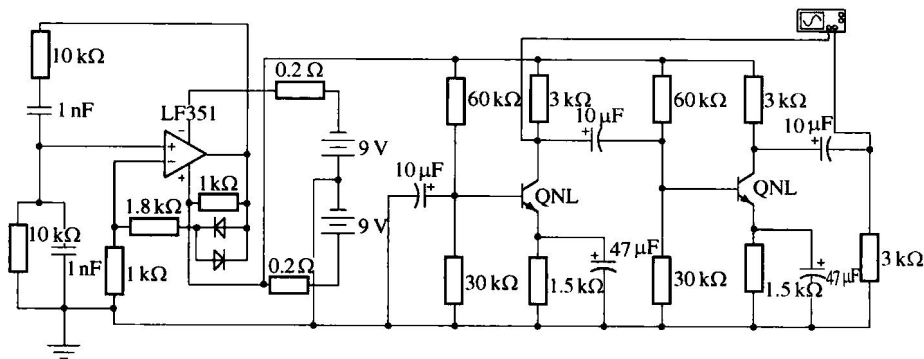


图 9 电源耦合引起干扰的例子

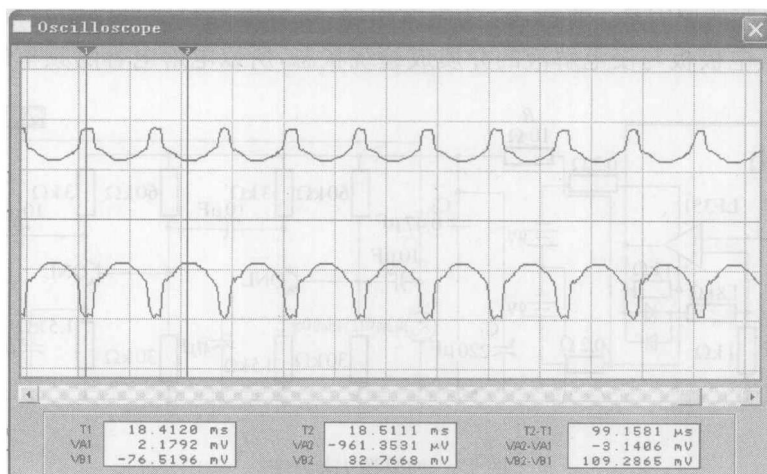


图 10 电源耦合干扰波形的仿真(放大器输入短路)

