

◎ 杜树春 编著

集成运算放大器 应用经典实例

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

集成运算放大器应用经典实例

杜树春 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

集成运算放大器是一种具有高电压放大倍数的直接耦合放大器，广泛应用于运算、测量、控制以及信号的产生、处理和变换等领域。本书介绍的是集成运算放大器应用电路经典实例，内容包括集成运算放大器基本知识，由运算放大器构成的信号放大电路、模拟信号运算电路，单电源供电的运算放大器，有源滤波器，通用运算放大器和专用运算放大器，由集成运算放大器构成的波形发生电路，电压比较器，利用集成运算放大器实现的电源电路设计，利用集成运算放大器实现的信号转换电路、集成运算放大器的其他应用。

本书不仅是电子技术入门的学习用书，也适合有一定电子技术基础的专业技术人员阅读使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

集成运算放大器应用经典实例/杜树春编著. —北京: 电子工业出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-121-27378-0

I. ①集… II. ①杜… III. ①集成电路-运算放大器 IV. ①TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240222 号

策划编辑: 张剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 夏平飞

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 497 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

印 次: 2015 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

集成运算放大器广泛应用于电子测量、自动控制、通信、计算机等各个领域。集成运算放大器，加上由电阻、电容等元件组成的外围电路，除了能实现“放大”和“运算”功能外，还可以实现多种电路功能。

本书由大量的集成运算放大器应用电路经典实例组成，对于大多数实用电路，既有电路原理图，也有对应的 Proteus 调试图，还有反映调试结果的各种图表。

本书最大特色是采用 Proteus 仿真和调试软件分析每一个实例。这种分析方法比传统的调试方法优越得多。传统方法是在要调试某一电路之前先画出电路原理图，购买所需元器件，根据电路图把元器件焊接起来（或插在面包板上），然后再用示波器、高低频信号发生器、频率仪和万用表等电子仪器配合调试。

新方法的开发步骤是：首先在电脑上用仿真软件画好电路原理图；其次在电脑上用仿真软件调试，直至调试完成；然后再购买元器件、焊接、再次调试……这样就可大大加快开发进度，降低开发费用。

本书共 11 章，第 1 章介绍集成运算放大器基本知识，第 2 章介绍由运算放大器构成的信号放大电路，第 3 章介绍由运算放大器构成的模拟信号运算电路，第 4 章介绍单电源供电的运算放大器，第 5 章介绍有源滤波器，第 6 章介绍通用运算放大器和专用运算放大器，第 7 章介绍由集成运算放大器构成的波形发生电路，第 8 章介绍电压比较器，第 9 章介绍利用集成运算放大器实现的电源电路设计，第 10 章介绍利用集成运算放大器实现的信号变换电路，第 11 章介绍集成运算放大器的其他应用。

电子资料包的内容，仍是以书中章为单位。在每一章（指第 1 章到第 11 章）下，都有一个章文件夹，每章下面有（例 N.1）、（例 N.2）……例文件夹，例文件夹内是这个例子的名称，打开名称文件夹，又有多个文件。其中，扩展名是“pdsprj”的文件是 Proteus 仿真原理图文件。在 Proteus 软件已安装在电脑中的前提下，双击具有“pdsprj”扩展名的文件就可进入显示电路原理图画面，也就是 Proteus 的调试状态。此时，就可以仿真和调试了。书中的所有例子都已在 Proteus 环境下调试通过，读者既可以原封不动地运行它，也可以用代替法替换其中的部分或全部元件及其参数边改边试。

目前，一般的工科院校电子、计算机、通信、机电等专业都开设有模拟电子技术课，集成运算放大器是模拟电子技术课的重要组成部分。本书可作为学生学习模拟电子技术课的辅助教材。

本书适合三部分人阅读或参考：一是学习模拟电子技术的大、中专及高等职业学校、中等职业学校的在校学生；二是和电子专业有关的广大工程技术人员；三是广大电子科技爱好者。

本书涉及集成运算放大器应用的各个方面，读者可以通读，也可以选读。书中所用 Proteus 的版本是 8.0，是最新版本。本书所有实例都已在 Proteus 8.0 下调试通过。对于初次接

触 Proteus 软件的人，可以先看一下介绍 Protues 软件用法的附录 A。

本书的另一特点是通俗易懂、图文并茂、取材新颖、资料丰富、实用性强。本书既适合初学者，也适合有一定电子技术基础的爱好者及专业技术人员。

在编写过程中，参考了许多国内外的优秀教材，这些已列在书末的参考文献中。在此，向以上单位和个人表示衷心感谢。

由于编著者水平有限且时间仓促，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 集成运算放大器基本知识	1
1.1 集成运算放大器的特点	1
1.2 集成运算放大器的主要参数	1
1.3 集成运算放大器的分类	3
1.4 通用型集成运算放大器	4
1.5 专用型集成运算放大器	5
1.6 集成运算放大器的理想化条件	5
1.7 集成运算放大器的电压传输特性	5
1.8 理想集成运算放大器的性能测试	6
1.9 放大电路的频率响应及波特图	8
1.10 实际集成运算放大器的性能测试	9
1.11 集成运算放大器在实际使用中应注意的问题	11
第2章 由运算放大器构成的信号放大电路	13
2.1 三种基本放大电路	13
2.1.1 反相放大器电路	14
2.1.2 同相放大器电路	17
2.1.3 差分放大器电路	19
2.2 仪表放大器	22
2.2.1 三运算放大器构成的仪表放大器	22
2.2.2 集成仪表放大器——低价、低功耗仪表放大器 AD620	24
2.2.3 集成仪表放大器——单电源电源限输出仪表放大器 AD623	27
2.3 小结	32
第3章 由运算放大器构成的模拟信号运算电路	34
3.1 比例运算电路	34
3.2 加减运算电路	34
3.3 积分运算电路和微分运算电路	39
3.4 对数运算电路和指数运算电路	43
3.5 小结	52
第4章 单电源供电的运算放大器	53
4.1 单电源供电的运算放大器	54
4.2 偏置电压为电源电压值一半的单电源运算放大器	56
4.3 偏置电压为任意值的单电源运算放大器	61
4.4 偏置电压与电源电压值相同的单电源运算放大器——四个范例	67
4.5 小结	78

第 5 章 有源滤波器	79
5.1 滤波电路基础知识	79
5.2 无源滤波电路	80
5.2.1 无源滤波器电路	80
5.2.2 无源滤波器的应用	86
5.3 有源滤波器	91
5.3.1 有源滤波电路	91
5.3.2 有源滤波电路应用	97
5.4 滤波器电路的应用	105
5.5 有源滤波器的多项式逼近	108
5.5.1 三种滤波器简介	108
5.5.2 低通滤波器的设计	110
5.5.3 低通滤波器的应用	116
5.5.4 滤波器系数表	118
5.6 小结	119
第 6 章 通用运算放大器和专用运算放大器	121
6.1 通用型运算放大器	122
6.2 高精度运算放大器	126
6.3 带容性负载能力强的运算放大器	130
6.4 高速运算放大器	134
6.5 低失真高速运算放大器	137
6.6 低噪声运算放大器	139
6.7 高输入阻抗运算放大器	144
6.8 小结	146
第 7 章 由集成运算放大器构成的波形发生电路	148
7.1 正弦波发生电路	148
7.1.1 RC 正弦波振荡电路	149
7.1.2 LC 正弦波振荡电路	151
7.1.3 由方波或三角波经低通滤波后形成的正弦波	152
7.2 非正弦波发生电路	153
7.2.1 矩形波发生电路	154
7.2.2 三角波发生电路	158
7.2.3 锯齿波发生电路	160
7.2.4 函数发生器电路	163
7.2.5 集成函数发生器	164
7.3 小结	167
第 8 章 电压比较器	169
8.1 电压比较器	169
8.1.1 单限比较器	169
8.1.2 滞回比较器	171

8.1.3	窗口比较器	172
8.2	电压比较器应用	173
8.2.1	单限比较器的应用	173
8.2.2	滞回比较器的应用	176
8.2.3	窗口比较器的应用	177
8.3	集成电压比较器	179
8.3.1	集成电压比较器 LM139	179
8.3.2	集成高速、低功耗、单电源 TTL 比较器 MAX907	180
8.3.3	集成低功耗双电压比较器 LM193	181
8.4	小结	183
第 9 章	利用集成运算放大器实现的电源电路设计	184
9.1	稳压源电路	184
9.2	基准电压源	189
9.2.1	由集成运算放大器搭成的基准电压源	190
9.2.2	集成基准电压源	196
9.3	基准电流源	198
9.3.1	由集成运算放大器搭成的基准电流源	199
9.3.2	集成基准电流源	209
9.4	小结	214
第 10 章	利用集成运算放大器实现的信号转换电路	215
10.1	电压 - 电流相互转换电路	215
10.2	精密整流电路	219
10.3	电压 - 频率相互转换电路	223
10.3.1	电压 - 频率转换电路	223
10.3.2	频率 - 电压转换电路	227
10.4	小结	231
第 11 章	集成运算放大器的其他应用	232
11.1	峰值检测电路	232
11.2	运算放大器构成的门电路	234
11.3	单稳态触发器电路	236
11.4	运算放大器构成的 RS 触发器	238
11.5	模拟电子电感	239
11.6	集成运算放大器和场效应管的混合应用	241
11.7	集成运算放大器在 D/A 转换器电路中的应用	242
附录 A	Proteus 8.0 软件用法	249
参考文献	296

第1章 集成运算放大器基本知识

自从1964年美国仙童公司研制出第一个单片集成运算放大器 $\mu A702$ 以来,集成运算放大器得到了广泛应用,目前它已成为线性集成电路中品种和数量最多的一类。

集成运算放大器是集成电路的一种,集成电路是指,在半导体制造工艺的基础上,把整个电路中的元器件制作在一块半导体基片上,构成特定功能的电子电路。集成电路的体积小,性能却很好。

集成电路可分为两类,即模拟集成电路和数字集成电路。模拟集成电路又包括运算放大器、功率放大器、电压比较器、直流稳压器和专用集成电路等。在模拟集成电路中,集成运算放大器是数量最多且应用最为广泛的一种。



1.1 集成运算放大器的特点

集成运算放大器是一种具有高电压放大倍数、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路。

由于制造工艺上的原因,集成运算放大器电路与分立元件相比较有以下特点。

- ☺ 在集成运算放大器中,所有的元器件都处在同一硅片上,距离非常近,又是通过同一工艺过程做出来的。这使同一芯片内的元件参数绝对值有相同的偏差,元件之间有较好的对称性和一致性。这有利于减小温漂。
- ☺ 在集成运算放大器中,电阻和电容的值不宜做得太大,故在结构上采用直接耦合方式。
- ☺ 集成电路中常采用差分放大电路,以克服直接耦合电路存在的温漂问题。
- ☺ 采用半导体体电阻作电阻。集成电路中采用三极管(或FET)代替电阻、电容和二极管等元器件。
- ☺ 芯片内没有电感器。
- ☺ 温度补偿元器件多为半导体三极管结构。
- ☺ 经常采用复合管或复合电路。
- ☺ 集成晶体管比集成电阻器、电容器容易得多,因此主要是用有源元件——晶体管代替无源元件(电阻器、电容器等),将无源元件的数量减到最少。



1.2 集成运算放大器的主要参数

【开环差模电压放大倍数 A_{od} 】在集成运算放大器无外加反馈时的差模电压放大倍数,又称开环差模增益,即

$$A_{od} = \frac{\Delta u_o}{\Delta(u_p - u_N)}$$

A_{od} 常用分贝(dB)表示,其分贝数为 $20\lg|A_{od}|$ 。集成运算放大器 A_{od} 一般为 $10^4 \sim 10^7$,即80dB~140dB。

【输入失调电压 U_{OS} 及其温漂 dU_{OS}/dT 】由于集成运算放大器的输入级电路参数不可能绝对对称,所以当输入电压为零时,输出电压 u_o 不为零。 U_{OS} 是使输出电压为零时在输入端加的补偿电压。 U_{OS} 越小越好,越小表明电路参数对称性越好。对于有外接调零电位器的集成运算放大器,可以通过改变电位器滑动端的位置使得零输入时输出为零。 U_{OS} 的值一般为几微伏至几毫伏。

dU_{OS}/dT 是 U_{OS} 的温度系数,是衡量集成运算放大器温漂的重要参数,其数值越小,表明集成运算放大器的温漂越小。

【输入失调电流 I_{OS} 及其温漂 dI_{OS}/dT 】集成运算放大器输出直流电压为零时,两个输入端偏置电流的差值定义为输入失调电流,即

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

式中 I_{B1} 、 I_{B2} 是集成运算放大器输入级差放管的基极偏置电流。输入失调电流 I_{OS} 反映输入级差放管输入电流的不对称程度。 I_{OS} 越小越好,一般为几纳安到 $1\mu\text{A}$ 之间。 dI_{OS}/dT 和 dU_{OS}/dT 的含义类似。 I_{OS} 和 dU_{OS}/dT 越小,表示集成运算放大器质量越好。

【输入偏置电流 I_{IB} 】 I_{IB} 是集成运算放大器输入级差放管的基极偏置电流的平均值。即 $I_{IB} = \frac{1}{2}(I_{B1} + I_{B2})$, I_{IB} 越小,信号源内阻对集成运算放大器静态工作点影响越小; I_{IB} 一般为零点几微安。

【差模输入电阻 (R_{id})】该参数表示集成运算放大器两个输入端之间的差模输入电压变化量与由它所引起的差模输入电流之比。在一个输入端测量时,另一输入端接固定的共模电压。 R_{id} 越大越好, R_{id} 越大,从信号源索取的电流越小。

【最大输出电压 U_{omax} 】指集成运算放大器工作在不失真情况下能输出的最大电压。

【最大共模输入电压 U_{icmax} 】共模输入电压如超过这个电压,运算放大器的共模抑制性能将大为下降,甚至造成器件损坏。

【最大差模输入电压 U_{idmax} 】 U_{idmax} 是集成运算放大器同相输入端和反相输入端之间所允许加的最大差模输入电压。超过此差模电压极限值,输入级将损坏。利用平面工艺制成的NPN管的 U_{idmax} 约为 $\pm 5\text{V}$,而横向双极型三极管可达 $\pm 30\text{V}$ 以上。

【最大输出电流 I_{omax} 】是指集成运算放大器所能输出的正向或负向的峰值电流。

【共模抑制比 K_{CMR} 】共模抑制比等于差模放大倍数与共模放大倍数 A_{oc} 之比的绝对值,即

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$$

常用分贝(dB)表示,其数值为 $20\lg K_{CMR}$ 。这个指标用以衡量集成运算放大器抑制温漂的能力。 K_{CMR} 越大越好, K_{CMR} 越大,对温度影响的抑制能力就越大。多数集成运算放大器的共模抑制比在80dB以上,高质量的可达160dB。

【转换速率 SR】转换速率又称上升速率,即

$$SR = \left| \frac{du_o}{dt} \right|$$

它反映集成运算放大器对快速变化信号的响应能力。SR 越大,表明集成运算放大器的高频性能越好。通用型集成运算放大器的 SR 约在 $0.5 \sim 100\text{V}/\mu\text{s}$ 范围。转换速率 SR 越大,输出才能跟上频率高、幅值大的输入信号变化,否则输入正弦波,输出是三角波。

【-dB 带宽 f_H 】 f_H 是使开环差模增益 A_{od} 下降 3dB (或使电压放大倍数下降到最大值的 70.7%) 时的信号频率。

【增益带宽积 GBW、单位增益带宽 f_C 】GBW 是开环差模增益 A_{od} 与带宽 f_H 的乘积,即

$$\text{GBW} = A_{od} \times f_H$$

GBW 是一个常数。

f_C 是开环差模增益 A_{od} 下降到 0dB (即 $A_{od} = 1$, 失去放大能力) 时的信号频率。增益带宽积 GBW 或单位增益带宽 f_C 高时,集成运算放大器适用于视频放大器。

【功耗 P_d 】表示器件在给定电源电压及空载条件下所消耗的电源总功率。



1.3 集成运算放大器的分类

- ① 以对适应的频率分,可分为直流放大器、音频放大器和视频放大器三种。直流放大器可对直流到低频信号放大,音频放大器可对数十赫兹到数十千赫兹的低频信号放大,视频放大器可对数十赫兹到数十兆赫兹的视频信号放大。
- ② 按芯片的供电方式分,也可分双电源供电、单电源供电或单双电源任选供电三种。对于双电源供电运算放大器,其输出可在零电压两侧变化,在差动输入电压为零时输出也可置零。采用单电源供电的运算放大器,输出在电源与地之间的某一范围变化。运算放大器的输入电位通常要求高于负电源某一数值,而低于正电源某一数值。经过特殊设计的运算放大器可以允许输入电位在从负电源到正电源的整个区间变化,甚至稍微高于正电源或稍微低于负电源也被允许。这种运算放大器称为轨到轨 (rail-to-rail) 输入运算放大器。
- ③ 按集成度 (即一个芯片上的运算放大器个数) 分,可分为单运算放大器、双运算放大器、三运算放大器、四运算放大器和八运算放大器。
- ④ 按电压和电流哪个起主要作用分,可分为电压模式集成运算放大器 (又叫电压反馈式集成运算放大器) 和电流模式集成运算放大器 (又叫电流反馈式集成运算放大器)。电压模式集成运算放大器是模拟电路中普遍使用的器件,开发得早、使用的人多,在模拟信号的处理上一直占主宰地位;电流模式集成运算放大器是以电流而不是以电压作为电路中的信号变量,并通过处理电流变量来决定电路的功能。近 20 多年来,电流模式集成运算放大器在信号处理中的巨大潜力逐渐被认识并被挖掘出来。
- ⑤ 以制造工艺分,可将运算放大器分为双极型、CMOS 型和 BiMOS 型三种,双极型运算放大器一般输入偏置电流及器件功耗较大;CMOS 型运算放大器输入阻抗高、功耗小,可在低电源电压下工作;BiMOS 型运算放大器以 MOS 管为输入级,使输入电阻高达 $10^{12}\Omega$ 以上。
- ⑥ 按性能指标分,运算放大器可分通用型集成运算放大器和专用型集成运算放大器两种。



1.4 通用型集成运算放大器

通用型集成运算放大器就是以通用为目的而设计的。这类器件的主要特点是价格低廉、产品量大面广，其性能指标能适合于一般性使用。例如 $\mu\text{A}741$ （单运算放大器）、LM358（双运算放大器）、LM324（四运算放大器）、NE5532（双运算放大器）及以场效应管为输入级的 LF356（单运算放大器）都属于此种。它们是目前应用最为广泛的集成运算放大器。通用型集成运算放大器性能指标见表 1-1。

表 1-1 通用型集成运算放大器性能指标

参数	单位	数值范围	参数	单位	数值范围
A_{od}	dB	65~100	K_{CMR}	dB	70~90
R_{id}	M Ω	0.5~2	f_c	MHz	0.5~2
U_{OS}	mV	2~5	SR	V/ μs	0.5~0.7
I_{OS}	μA	0.2~2	P_d	mW	80~120
I_{IB}	μA	0.3~7			

【 $\mu\text{A}741$ 】 $\mu\text{A}741$ 运算放大器，美国仙童公司（fairchild）发明，是世界上第一块成熟的集成运算放大器，在上世纪 60 年代后期广泛流行，直到今天 $\mu\text{A}741$ 运算放大器仍是电子学科技中讲解运算放大器原理的典型元器件。 $\mu\text{A}741$ ，国内型号为 F007，它是一种性能较好、放大倍数较高、且具有内部补偿的通用型集成运算放大器。它是一个单运算放大器，即一个芯片内只有一个运算放大器。它由 $\pm 15\text{V}$ 两路电源供电。主要性能：输入电阻大于 $1\text{M}\Omega$ ；输出电阻约为 60Ω ；开环差模电压放大倍数大于 106dB 。 $\mu\text{A}741$ 创造了一种集成电路经久不衰的奇迹，50 多年来，一直在生产、在使用。

【LM324】 LM324 由四个独立的高增益、内部频率补偿运算放大器组成。它可在宽电压范围（ $3\text{V} \sim 30\text{V}$ ）的单电源下工作，也可以在双电源下工作（ $\pm 1.5\text{V} \sim \pm 15\text{V}$ ）。具有电压增益大、有很低的电源电流消耗、输出电压幅度大等特点。

【LM358】 LM358 是双运算集成放大器，其内部包括两个互相独立的、高增益、内部频率补偿运算放大器模块。适用于电压范围很宽的单电源工作方式（ $3\text{V} \sim 30\text{V}$ ）和双电源工作方式（ $\pm 1.5\text{V} \sim \pm 15\text{V}$ ）。

【NE5532】 NE5532 是一种双运算放大器高性能低噪声运算放大器。适用于电压范围很宽的双电源工作方式（ $\pm 3\text{V} \sim \pm 20\text{V}$ ）。增益带宽积 GBW 为 10MHz ，转换速率典型值为 $9\text{V}/\mu\text{s}$ ，等效输入噪声为 $5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{kHz}$ 。

【LF356】 LF356 的输入级采用了场效应晶体管（FET 管），是一种高输入阻抗单运算放大器。双电源工作方式（ $\pm 5\text{V} \sim \pm 18\text{V}$ ），增益带宽积 GBW 为 5MHz ，转换速率典型值为 $12\text{V}/\mu\text{s}$ 。

上述 5 个集成运算放大器均属通用型集成运算放大器，本书中大部分集成运算放大器应用实例都使用这些芯片。



1.5 专用型集成运算放大器

【高输入阻抗型】通用型集成运算放大器的差模输入电阻在 $1\text{M}\Omega$ 以上，而高输入阻抗型集成运算放大器的差模输入电阻高达 $10^4 \sim 10^{12}\text{M}\Omega$ 。

【高精度、低漂移型】这种类型的集成运算放大器，一般用于毫伏量级或更低的微弱信号的精密检测、高精度稳压电源及自动控制仪表中。

【高速型】高速型集成运算放大器的转换速率 $\text{SR} > 30\text{V}/\mu\text{s}$ ，最高可达几百 $\text{V}/\mu\text{s}$ 。

【低功耗型】对这类集成运算放大器，要求工作在高电源电压时，最大功耗不大于 6mW ；或要求工作在低电源电压（如 $1.5 \sim 4\text{V}$ ）时，具有低静态功耗和保持良好的性能。目前许多产品的功耗均小于 0.6mW ，有的产品已达微瓦级。

【高压型】为了得到高的输出电压，或者大的输出功率，需要解决集成运算放大器的耐压和动态工作范围问题。目前，耐压指标可达 300V 左右。



1.6 集成运算放大器的理想化条件

由于集成运算放大器具有极高的开环电压放大倍数、很大的差模输入电阻和很小的输出电阻，通常是将集成运算放大器看成是理想的运算放大器作近似分析。

理想化条件主要是：

- ⊙ 开环差模增益（放大倍数） $A_{\text{od}} \rightarrow \infty$ ；
- ⊙ 差模输入电阻 $R_{\text{id}} \rightarrow \infty$ ；
- ⊙ 输出电阻 $R_{\text{o}} \rightarrow 0$ ；
- ⊙ 上限截止频率 $f_{\text{H}} \rightarrow \infty$ ；
- ⊙ 共模抑制比 $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$ ；
- ⊙ 单位增益带宽 $\text{GW} \rightarrow \infty$ ；
- ⊙ 失调电压 U_{I0} 、失调电流 I_{I0} 和它们的温漂均为零，且无任何内部噪声。



1.7 集成运算放大器的电压传输特性

集成运算放大器有同相输入端和反相输入端，这里的“同相”和“反相”是指运算放大器的输入电压与输出电压之间的相位关系，其符号如图 1-1（a）所示。从外部看，可以认为集成运算放大器是一个双端输入、单端输出，具有高差模放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、能较好地抑制温漂的差分放大电路。

集成运算放大器的输出电压 u_{o} 与输入电压 $(u_{\text{p}} - u_{\text{N}})$ 之间的关系曲线称为电压输出特性，即

$$u_{\text{o}} = f(u_{\text{p}} - u_{\text{N}}) \quad (1-1)$$

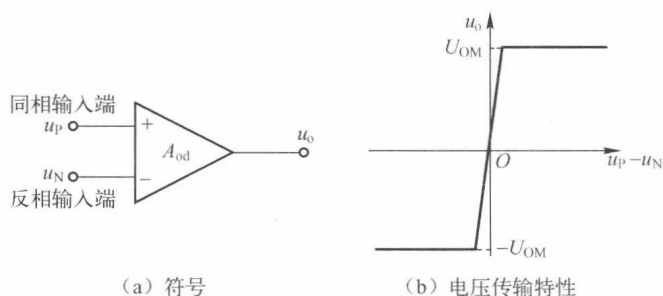


图 1-1 集成运算放大器的符号和电压传输特性

对于正、负两路电源供电的集成运算放大器，电压传输特性如图 1-1 (b) 所示。从电压传输特性曲线可以看出，集成运算放大器有线性放大区域（称为线性区）和饱和区域（称为非线性区）两部分。在线性区，曲线的斜率为电压放大倍数；在非线性区，输出电压只有两种可能的情况， $+U_{OM}$ 或 $-U_{OM}$ 。

由于集成运算放大器放大的是差模信号，且没有通过外电路引入反馈，故称其放大倍数为差模开环放大倍数，记作 A_{od} ，因而当集成运算放大器工作在线性区时

$$u_o = A_{od}(u_p - u_n) \quad (1-2)$$

通常 A_{od} 非常高，可达几十万倍，因此集成运算放大器电压传输特性中的线性区非常窄。



1.8 理想集成运算放大器的性能测试

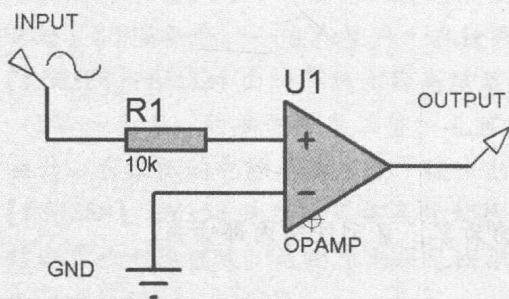


图 1-2 理想运算放大器性能测试图

【例 1-1】图 1-2 所示为理想运算放大器性能测试图，图中 U1 为理想运算放大器，其反相输入端接地，同相输入端通过一限流电阻 R1 接输入信号 INPUT，在输出端的 OUTPUT 处输出结果。

先给 INPUT 送一幅度为 $\pm 15\mu\text{V}$ 、频率为 1kHz 的交流电压信号，用 Proteus 图形仿真功能，可以绘出电路的 I/O 电压关系图，如图 1-3 所示。由图可见，图中的黑线是输入信号 INPUT，

它看起来是一条直线，这是因为信号幅度太小，还不能显示出来。红线是输出信号 OUTPUT，它是一种幅度为 $\pm 15\text{V}$ 、频率为 1kHz 的正弦波电压信号。这表明，放大信号没有失真，电压放大倍数是 1000000，或 10^6 ，或 120dB。

再给 INPUT 送一幅度为 $\pm 20\mu\text{V}$ 、频率为 1kHz 的交流电压信号，用 Proteus 图形仿真功能，绘出电路的 I/O 电压关系图，如图 1-4 所示。由图可见，图中的黑线是输入信号 INPUT，它看起来是一条直线。红线是输出信号 OUTPUT，它是一种幅度超过 $\pm 15\text{V}$ 部分已被削去的周期电压信号。这表明，放大信号已失真。

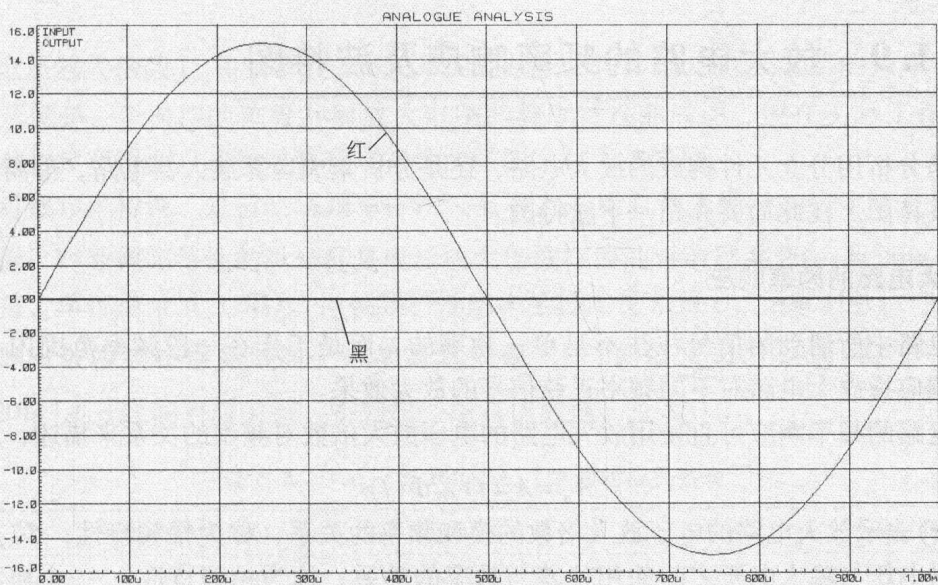


图 1-3 理想运算放大器性能测试结果图 1

由此看出，该理想运算放大器的 $A_{od} = 10^6$ ， $U_{OM} = 15V$ ，只有当 $|u_p - u_N| < 15\mu V$ 时，运算放大器才工作在线性区。换句话说，若 $|u_p - u_N| > 15\mu V$ ，则集成运算放大器进入非线性区，输出电压 u_o 不是 $+15V$ ，就是 $-15V$ 。

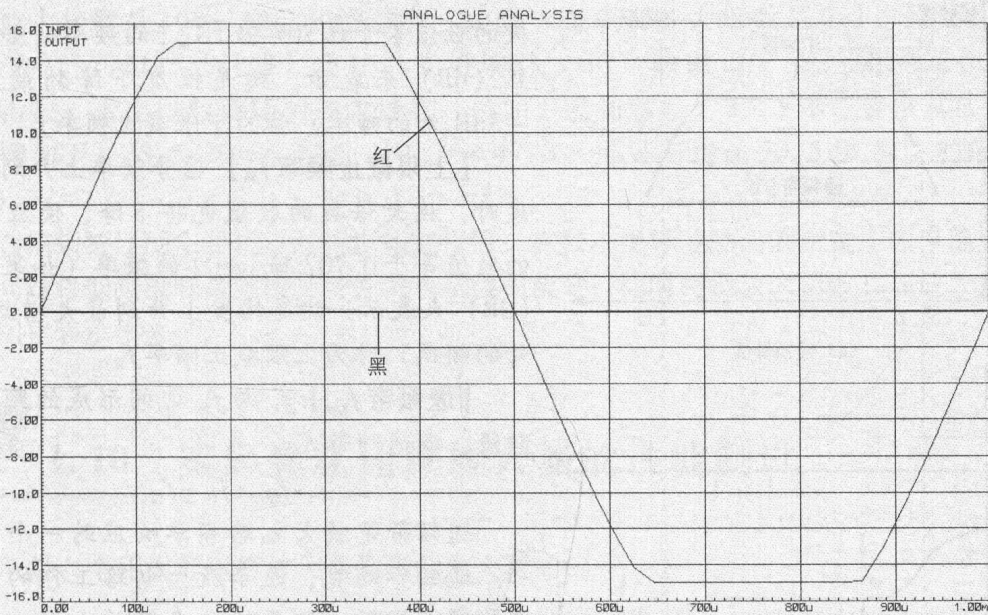


图 1-4 理想运算放大器性能测试结果图 2

这里说的是理想运算放大器性能，实际集成运算放大器的性能指标均为有限值。随着新型运算放大器的不断出现，性能指标越来越向理想靠近。



1.9 放大电路的频率响应及波特图

不管是分析用分立元件构成的放大电路，还是分析集成运算放大器电路，都离不开一个工具——波特图。在此简要介绍一下波特图。

1. 放大电路的频率响应

电子电路中所遇到的信号往往不是单一频率的，而是工作在一段频率范围内一段频率的。频率响应指放大电路对不同频率正弦信号的放大效果。

放大电路的频率响应可直接用放大电路的电压放大倍数对频率的关系来描述，即

$$\dot{A}_u = A_u(f) \angle \Phi(f)$$

式中， $A_u(f)$ 表示放大电路的电压放大倍数的模和频率的关系，称为幅频特性； $\Phi(f)$ 表示放大电路输出电压与输入电压之间的相位差与频率的关系，称为相频特性。一个典型的单管（单个晶体管）共射放大电路的幅频特性和相频特性分别示于图 1-5 (a) 和 (b) 中。

【幅频特性曲线】放大倍数的数值与信号频率的关系曲线，称幅频特性曲线。 \dot{A}_m 为中频放大倍数。

【下限截止频率 f_L 】在信号频率下降到一定程度时，放大倍数的数值明显下降，使放大倍数的数值等于 0.707 倍 $|\dot{A}_m|$ 的频率（如果用增益 (dB) 来表示，就是幅度下降到最大增益 -3dB 处的频率）称为下限截止频率 f_L 。

【上限截止频率 f_H 】信号频率上升到一定程度时，放大倍数的数值也将下降，使放大倍数的数值等于 0.707 倍 $|\dot{A}_m|$ 的频率（如果用增益 (dB) 来表示，就是幅度上升到最大增益 -3dB 处的频率）称为上限截止频率 f_H 。

【通频带 f_{bw} 】 f_L 与 f_H 之间形成的频带称中频段，或通频带 f_{bw} 。

$$f_{bw} = f_H - f_L$$

通频带是放大电路频率响应的一个重要指标。通频带越宽，表示放大电路工作的频率范围越宽。例如，质量好的音频放大器，其通频带可从 20Hz ~ 20 kHz，恰好覆盖了人类能听到最低和最高频率的整个范围。

对于运算放大器，下限截止频率 f_L 一般等于零，上限截止频率 f_H 就是运算放大器的频带宽度。

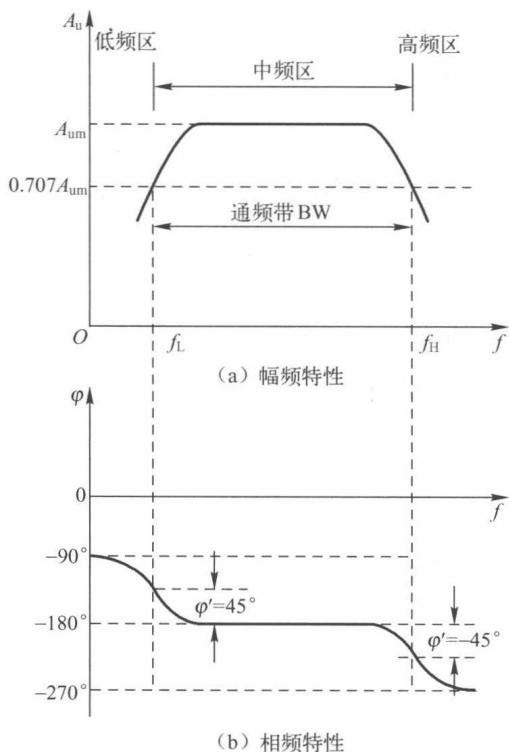


图 1-5 一个典型的单管（单个晶体管）共射放大电路的频率特性

2. 波特图

根据电压放大倍数 \dot{A}_u 和频率 f 之间关系的表达式,可以画出放大电路的频率特性曲线。图1-5所示就是一个典型的单管共射放大电路的频率特性曲线图。但在实际工作中,应用较多的是对数频率特性。这种对数频率特性曲线图又称为波特图。

所谓对数频率特性,是指绘制频率特性时基本上采用对数坐标。如横坐标是频率 f ,采用对数坐标;对数幅频特性的纵坐标是电压放大倍数幅值的对数再乘20,即 $20\lg|\dot{A}_u|$,亦即对数增益,单位是分贝(dB),但相频特性的纵坐标是位相角 φ ,不取对数。

在绘制对数幅频特性曲线时,常常需要根据 $|\dot{A}_u|$ 的值来求出 $20\lg|\dot{A}_u|$ 。为了说明 $|\dot{A}_u|$ 与 $20\lg|\dot{A}_u|$ 之间对应关系,特列出一组具体数据,见表1-2。

表 1-2 $|\dot{A}_u|$ 与 $20\lg|\dot{A}_u|$ 之间对应关系表

$ \dot{A}_u $	0.001	0.01	0.1	$\sqrt{2}/2$	1	$\sqrt{2}$	2	10	100	1000
$20\lg \dot{A}_u $ (dB)	-60	-40	-20	-3	0	3	6	20	40	60

由表可见,每当 $|\dot{A}_u|$ 增大为原来的10倍时,相应的 $20\lg|\dot{A}_u|$ 将增加20dB;若 $|\dot{A}_u|$ 增大一倍,则相应的 $20\lg|\dot{A}_u|$ 增加6dB;当 $|\dot{A}_u|=1$ 时, $20\lg|\dot{A}_u|=0$;当 $|\dot{A}_u|>1$ 时, $20\lg|\dot{A}_u|>0$;当 $|\dot{A}_u|<1$ 时, $20\lg|\dot{A}_u|<0$ 。

如果已知增益(单位是分贝)要求放大倍数时,可查表1-2。如已知增益为40dB,查表知放大倍数是100;如已知增益为-20dB,查表知放大倍数是0.1。假如你要查的数表中没有,可以自己计算。方法:先将增益(dB)除以20,把所得的商作为以10为底的指数,求出指数值即为放大倍数。例如,已知增益为33.5dB,要求其放大倍数。计算步骤如下: $33.5/20=1.675$, $10^{1.675}=47.3$ 。可见与增益33.5dB对应的放大倍数为47.3。

对数幅频特性的主要优点是可以拓宽视野,在较小坐标范围内表示宽广频率范围的变化情况,同时将低频段和高频段的特性都表示得很清楚,同时将低放大倍数和高放大倍数的特性都在图里表示出来。



1.10 实际集成运算放大器的性能测试

以下是一个用实际运算放大器构建的放大器的例子。

【例1-2】用运算放大器LF356设计一个同相输入放大器,要求放大倍数为10。

用LF356设计的同相输入放大器如图1-6所示。图中,LF356的电源为 $\pm 15\text{V}$, $R_F=90\text{k}\Omega$, $R_1=10\text{k}\Omega$,根据同相比例放大器的放大倍数计算公式可知 $A=1+R_F/R_1=10$ 。