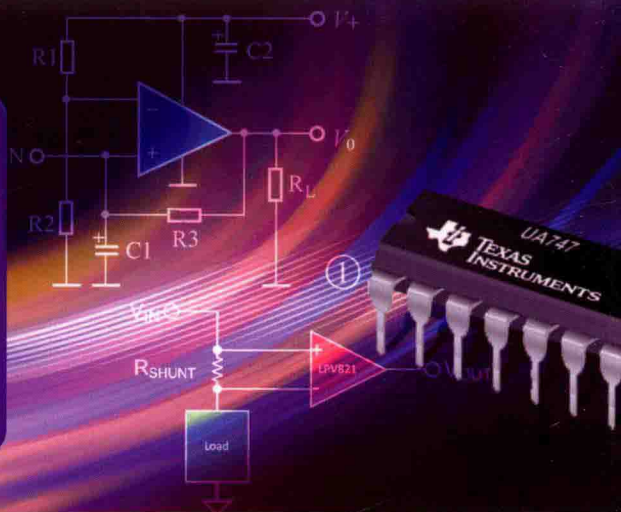




卓越工程师培养计划

▪ 电工技术 ▪



杜树春 编著

# 集成运算放大器 及其应用



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>

电工技术

# 集成运算放大器及其应用

杜树春 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以实例讲解的形式,全面、系统地介绍了集成运算放大器及其应用。本书主要内容包括集成运算放大器基础知识、由运算放大器构成的信号放大电路、仪表放大器、由运算放大器构成的模拟信号运算电路、有源滤波电路、电压比较器、波形发生电路、信号转换电路、在集成运算放大器使用中的限幅电路、电流反馈运算放大器、参考电压芯片的应用。书中介绍了 100 多个集成运算放大器应用电路经典实例,每个实例不仅介绍了电路原理,还给出了相应的 Proteus 调试结果。

本书内容通俗易懂,实用性强,既适合初学者自学使用,也可供相关专业的工程技术人员阅读参考,还可作为高等学校相关专业的教学用书。

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

集成运算放大器及其应用 / 杜树春编著. —北京: 电子工业出版社, 2018.10

(卓越工程师培养计划)

ISBN 978-7-121-35048-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 214089 号

策划编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 夏平飞

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 北京天宇星印刷厂

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: 15 字数: 384 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版

印 次: 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: zhang@phei.com.cn。

# 前 言

什么是运算放大器？顾名思义，运算放大器就是具有“放大”和“运算”功能的电子器件。其实，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，还可以实现各种各样的电路功能。集成运算放大器就是做成集成电路器件的运算放大器，广泛应用于电子测量、自动控制、通信、计算机等多个领域。

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要画出电路原理图，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。

新方法开发步骤是：首先在计算机上用仿真软件画好电路原理图；其次在计算机上用仿真软件调试，直至调试完成；然后购买元器件、焊接、再次调试……这样就可大大加快开发进度，降低开发成本。

为了便于读者阅读，特提供本书范例下载资源，请访问<http://yydz.phei.com.cn>，到“资源下载”栏目下载。本书范例下载资源的内容是以书中章节为单位的，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，扩展名为“pdsprj”的文件是 Proteus 仿真原理图文件。在计算机已安装 Proteus 软件的前提下，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 Protues 的调试状态，此时就可以进行仿真和调试了。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，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。在本书范例下载资源中，还包括 Protues 8.0 软件用法和全书例题索引等内容。

书中，公式的推导较少，大都是只取其结论。对公式推导感兴趣的读者可查阅书末的参考文献。本书的侧重点是各种应用电路原理图的绘制及电路的调试、测试、仿真，并将测试结果与理论计算值进行比较，以使读者花最少的时间掌握各类运算放大器经典电路的使用方法。

书中，Protues 软件是调试电路的工具。在用 Protues 软件画的电路原理图中，电容的单位  $\mu\text{F}$ 、 $\text{nF}$ 、 $\text{pF}$  分别写为 u、n、p；电阻的单位是  $\text{k}\Omega$ 、 $\text{M}\Omega$  时，对应的表示法是 k 和 M；当电阻的单位是  $\Omega$  时，只用纯数字表示，如 100，就表示  $100\Omega$ 。用 Protues 软件画的电路原理图中，符号不能使用下标，如  $R_F$ ，只能写为 RF。

本书所用 Proteus 的版本是 8.0，书中的所有实例都是在 Proteus 8.0 下调试通过的。对于初次接触 Proteus 软件的读者，在阅读本书正文之前，建议先熟悉一下 Protues 8.0 软件的

用法。

目前，一般的工院校中电子、计算机、通信、机电等专业都开有“模拟电子技术”课程，集成运算放大器是“模拟电子技术”课程的重要组成部分。本书可作为学生学习“模拟电子技术”这门课程的辅助教材。

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。

本书的另一特点是通俗易懂，实用性强，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。

在图书编写过程中，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，同时也得到了电子工业出版社的指导和帮助。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疏漏，恳请读者批评指正。

编 著 者

# 目 录

第 1 章 集成运算放大器基础知识	1
1.1 放大器的概念	1
1.2 电压模式集成运算放大器的主要参数	2
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	10
第 2 章 由运算放大器构成的信号放大电路	13
2.1 基本放大电路	13
2.2 反相输入放大电路	14
2.2.1 反相输入放大基本电路	14
2.2.2 反相输入放大电路的性能扩展	14
2.2.3 反相输入放大电路的应用实例	16
2.3 同相输入放大电路	19
2.3.1 同相输入放大基本电路	19
2.3.2 电压跟随器	20
2.3.3 可编程增益放大器	20
2.3.4 同相输入放大器的堵塞现象及其预防	21
2.3.5 同相输入放大电路应用实例	22
2.4 差分输入放大电路	27
2.4.1 差分输入放大基本电路	27
2.4.2 高输入电阻的差分输入放大电路	27
2.4.3 高共模输入的差分输入放大电路	29
2.4.4 差分输入放大电路应用实例	29
第 3 章 仪表放大器	33
3.1 仪表放大器的定义	33

3.2	由运算放大器构成的仪表放大器 .....	34
3.2.1	由双运算放大器构成的仪表放大器 .....	34
3.2.2	由三运算放大器构成的仪表放大器 .....	35
3.3	集成仪表放大器 .....	37
3.3.1	低价、低功耗仪表放大器 AD620 .....	37
3.3.2	低漂移、低功耗仪表放大器 AD621 .....	40
3.3.3	低成本仪表放大器 AD622 .....	41
3.3.4	精密仪表放大器 AD624 .....	42
3.3.5	单电源满摆幅仪表放大器 MAX4460-62 .....	45
3.3.6	轨对轨仪表放大器 LTC2053 .....	48
第4章	由运算放大器构成的模拟信号运算电路 .....	51
4.1	比例运算电路 .....	51
4.2	加减运算电路 .....	51
4.2.1	求和运算电路 .....	52
4.2.2	加减运算电路 .....	53
4.2.3	组合加减运算电路 .....	53
4.2.4	求和及加减运算电路应用实例 .....	54
4.3	积分运算电路和微分运算电路 .....	57
4.3.1	积分运算电路 .....	57
4.3.2	微分运算电路 .....	59
4.3.3	微积分运算电路应用实例 .....	60
4.4	对数运算和指数运算电路 .....	63
4.4.1	对数运算电路 .....	63
4.4.2	指数(或反对数)运算电路 .....	66
4.4.3	对数和指数运算电路应用实例 .....	67
第5章	有源滤波电路 .....	72
5.1	有源滤波电路的基本性能和结构 .....	72
5.2	有源低通滤波电路 .....	76
5.2.1	一阶有源低通滤波电路 .....	76
5.2.2	二阶有源低通滤波电路 .....	79
5.3	有源高通滤波电路 .....	86
5.3.1	一阶有源高通滤波电路 .....	86
5.3.2	二阶有源高通滤波电路 .....	89
5.4	有源带通滤波电路 .....	94
5.4.1	一阶有源带通滤波电路 .....	94
5.4.2	二阶有源带通滤波电路 .....	96
5.5	有源带阻滤波电路 .....	101
5.5.1	Ⅲ型有源带阻滤波电路 .....	102
5.5.2	Ⅱ型二阶带通与加法器构成带阻滤波电路 .....	104

5.6	全通滤波电路	106
5.7	状态变量滤波电路和集成通用有源滤波电路	108
5.7.1	状态变量滤波电路	108
5.7.2	集成通用有源滤波电路	116
<b>第 6 章</b>	<b>电压比较器</b>	<b>117</b>
6.1	电压比较器介绍	118
6.1.1	单(门)限电压比较器	118
6.1.2	双(门)限电压比较器	122
6.1.3	迟滞比较器	126
6.2	电压比较器应用	128
6.2.1	单(门)限电压比较器	128
6.2.2	双(门)限电压比较器	132
6.2.3	迟滞比较器	137
6.3	集成电压比较器	140
6.3.1	集成电压比较器 LM2901	140
6.3.2	单双电源、低功耗、超快、精密 TTL 比较器 MAX913	141
6.3.3	超低功耗、单双电源电压比较器 MAX921	142
6.3.4	低成本、低功耗电压比较器 MAX9203	143
<b>第 7 章</b>	<b>波形发生电路</b>	<b>146</b>
7.1	正弦波发生电路	146
7.1.1	反馈式正弦波发生器	146
7.1.2	积分式正弦波发生器	150
7.1.3	由方波或三角波经低通滤波后形成的正弦波	154
7.2	非正弦波发生电路	155
7.2.1	矩形波发生电路	156
7.2.2	三角波发生电路	162
7.2.3	锯齿波发生电路	164
7.2.4	函数发生电路	167
7.2.5	集成函数发生器	168
<b>第 8 章</b>	<b>信号转换电路</b>	<b>173</b>
8.1	电压-电流、电流-电压转换电路	173
8.1.1	电压-电流转换电路	173
8.1.2	电流-电压转换电路	174
8.2	精密整流电路	176
8.2.1	精密半波整流电路	176
8.2.2	精密全波整流电路	178
8.2.3	绝对值电路	179
8.3	电压-频率、频率-电压转换电路	179
8.3.1	电压-频率转换电路	180



8.3.2	频率-电压转换电路	183
<b>第9章</b>	<b>在集成运算放大器使用中的限幅电路</b>	<b>186</b>
9.1	限幅电路的分类及主要指标	186
9.2	二极管接在运算放大器输入回路中的限幅电路	187
9.2.1	二极管串联式限幅电路	187
9.2.2	二极管并联式限幅电路	188
9.2.3	二极管区间限幅电路	190
9.3	二极管接在运算放大器反馈电路中的限幅电路	193
9.3.1	二极管双向限幅电路	193
9.3.2	稳压管双向限幅电路	196
9.3.3	二极管桥式区间限幅电路	199
<b>第10章</b>	<b>电流反馈运算放大器</b>	<b>203</b>
10.1	电流反馈运算放大器的同相输入方式	203
10.1.1	闭环直流特性	203
10.1.2	闭环频率特性	204
10.1.3	实例	204
10.2	电流反馈运算放大器的反相输入方式	205
10.2.1	闭环直流特性	205
10.2.2	闭环频率特性	206
10.2.3	实例	206
10.3	CFA 构成的积分电路	207
10.3.1	CFA 运算放大器构成的积分电路	207
10.3.2	同相积分电路实例	208
10.3.3	反相积分电路实例	209
10.4	CFA 构成的单端-差分信号转换电路	210
10.4.1	单端-差分信号转换电路介绍	210
10.4.2	单端-差分信号转换电路应用实例	210
10.5	CFA 构成的宽带高速数据放大器	211
10.6	CFA 运算放大器和 VFA 运算放大器性能比较	213
10.6.1	VFA 运算放大器——电压模式运算放大器 AD8047	213
10.6.2	CFA 运算放大器——电流模式运算放大器 AD8011A	214
10.7	CFA 运算放大器的应用实例	216
10.7.1	CFA 运算放大器——600MHz、50mW 双通道放大器 AD8002	216
10.7.2	CFA 运算放大器——3000V/ $\mu$ s、35mW 四通道放大器 AD8004	218
10.7.3	CFA 运算放大器——400 $\mu$ A 超低功耗、单通道高速放大器 AD8005	219
<b>第11章</b>	<b>参考电压芯片的应用</b>	<b>222</b>
11.1	2.5V/3V 高精度电压参考电路 AD780	222
11.2	10V 高精度电压参考电路 AD581	223

---

11.3 具有四个不同输出电压的高精度电压参考电路 AD584 .....	224
11.4 10V 高精度电压参考电路 AD587 .....	225
11.5 可调式精密电压参考电路 TL431 .....	226
11.6 低功耗电压基准二极管 LM285/LM385 .....	228
11.7 低功耗、低成本电压参考电路 AD680 .....	229
参考文献 .....	230

# 第1章 集成运算放大器基础知识

第一片商用单片模拟集成电路是电压模式（电压输入-电压输出）集成运算放大器，自从它出现以来，就在实现各种功能的应用中一直占据着主导地位。近十几年来，随着被处理信号的频率越来越高，速度越来越快，加之电路设计技术的发展和集成工艺水平的提高，电流模式运算放大器被研制出来，同时还出现了很多新型的电流模式的运算放大器，电流模式电路的发展和應用將模拟集成电路推进到了一个新阶段。



## 1.1 放大器的概念

按照输出变化量（即输出信号）与输入变化量（即输入信号）的电量不同，放大器可以分为四种类型。

1) **电压放大器** 把电压输入信号放大，为负载提供电压输出信号，属于电压控制电压源。电压放大器的放大倍数称为电压放大倍数，用  $A_U$  表示。

$$A_U = \frac{U_o}{U_i}$$

2) **电流放大器** 它的输入信号是电流，输出信号也是电流，属于电流控制电流源。电流放大器的放大倍数称为电流放大倍数，用  $A_I$  表示。

$$A_I = \frac{I_o}{I_i}$$

3) **跨阻放大器** 它的输入信号是电流，输出信号是电压，属于电流控制电压源。跨阻放大器的放大倍数称为跨阻放大倍数，用  $A_{UI}$  表示。

$$A_{UI} = \frac{U_o}{I_i}$$

4) **跨导放大器** 它的输入信号是电压，输出信号是电流，属于电压控制电流源。跨导放大器的放大倍数称为跨导放大倍数，用  $A_{IU}$  表示。

$$A_{IU} = \frac{I_o}{U_i}$$

四种放大器的区别如下。

(1) 传输系数不同，传输系数的量纲也各有差异。

(2) 信号源（或前级）对于不同放大器的输入电阻  $R_i$  要求不同。设信号源内阻为  $R_s$ ，对于电压为输入量的放大器，要求  $R_i \gg R_s$ ；对于电流为输入量的放大器，要求  $R_i \ll R_s$ 。

(3) 输出电阻  $R_o$  的要求不同。对于电压为输出量的放大器，要求  $R_o \ll R_L$ ；对于电流为

输出量的放大器, 要求  $R_o \gg R_L$  ( $R_L$  为放大器的负载电阻)。

对于一种具体的放大器, 必然属于上述四种基本放大器之一。严格地说, 只有电压放大器属于电压模式电路, 只有电流放大器属于电流模式电路。而跨阻放大器及跨导放大器属于电流模式/电压模式混合模式电路。但是由于这两种放大器中电流对电路性能起决定作用, 所以通常把除电压放大器以外的放大器都归入电流模式电路。

电压模式集成运算放大器已有 40 多年历史, 目前仍在广泛使用, 仍是集成运算放大器应用的主力军。而电流模式集成运算放大器在近 20 多年才得到重视和发展。本书介绍的集成运算放大器, 仍以电压模式的集成运算放大器为主。在本书中, 如果没有专门声明, 都是指电压模式的集成运算放大器, 只有第 10 章专门介绍电流模式集成运算放大器。



## 1.2 电压模式集成运算放大器的主要参数

1) 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。  $A_{od} = \Delta u_o / \Delta(u_p - u_n)$ , 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  $80 \sim 140\text{dB}$ 。

2) 输入失调电压  $U_{os}$  及其温漂系数  $dU_{os}/dT$  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。

3) 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。  $I_{os} = |I_{B1} - I_{B2}|$ , 其中  $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$  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  $1\mu\text{A}$ 。  $dI_{os}/dT$  和  $dU_{os}/dT$  的含义类似。  $I_{os}$  和  $dI_{os}/dT$  越小, 表示集成运算放大器质量越好。

4) 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。

5) 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。

6) 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。

7) 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。

8) 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,输入级将被损坏。利用平面工艺制成的NPN管的 $U_{idmax}$ 约为 $\pm 5V$ ,而横向双极型三极管可达 $\pm 30V$ 以上。

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

10) 共模抑制比  $K_{CMR}$  共模抑制比等于差模电压放大倍数  $A_{od}$  与共模电压放大倍数  $A_{oc}$  之比的绝对值,即  $K_{CMR} = |A_{od}/A_{oc}|$ ,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好。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。

11) 转换速率 SR 转换速率又称上升速率,  $SR = |du_o/dt|$ ,它反映了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为0.5~100V/ $\mu s$ 。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。

12) -3dB 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。

13) 增益带宽积 GBW 和单位增益带宽  $f_C$  GBW是开环差模增益  $A_{od}$  与带宽  $f_H$  的乘积,即  $GBW = A_{od} \times f_H$ ,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。

14) 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

集成运算放大器有多种分类方法。

按适用的频率分,集成运算放大器可分为直流放大器、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进行放大,音频放大器可对数十赫到数十千赫的低频信号进行放大,视频放大器可对数十赫到数十兆赫的视频信号进行放大。

按芯片的供电方式分,集成运算放大器可分双电源供电、单电源供电或单双电源任选供电三种。对于双电源供电的集成运算放大器,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。采用单电源供电的集成运算放大器,输出在电源与地之间的某一范围内变化。集成运算放大器的输入电压通常要求高于负电源某一数值,而低于正电源某一数值。经过特殊设计的集成运算放大器可以允许输入电压在从负电源到正电源的整个区间变化,甚至允许稍微高于正电源或稍微低于负电源。这种集成运算放大器称为轨到轨(rail-to-rail)输入集成运算放大器。

按集成度(即一个芯片上的运算放大器个数)分,集成运算放大器可分为单运算放大器、双运算放大器和四运算放大器。

按电压和电流哪个起主要作用分,集成运算放大器可分为电压模式集成运算放大器和电流模式集成运算放大器。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,在模拟信号的处理中一直占据主宰地位;电流模式集成运算放大器以电流

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。

按制造工艺分，可将集成运算放大器分为双极型、CMOS型和BiMOS型三种，双极型集成运算放大器一般输入偏置电流，器件功耗较大；CMOS型集成运算放大器输入阻抗高、功耗小，可在低电源电压下工作。BiMOS型集成运算放大器以MOS管为输入级，可使输入电阻高达 $10^{12}\Omega$ 以上。

按性能指标分，集成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、使用面广，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）都属于通用型集成运算放大器。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如表1-1所示。

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 $\Omega$	0.5~2	$f_c$	MHz	0.5~2
$U_{os}$	MV	2~5	SR	V/ $\mu\text{s}$	0.5~0.7
$I_{os}$	$\mu\text{A}$	0.2~2	$P_d$	mW	80~120
$I_{IB}$	$\mu\text{A}$	0.3~7			

1)  $\mu\text{A}741$   $\mu\text{A}741$ ，是由美国仙童公司（Fairchild）发明的，是世界上第一块成熟的集成运算放大器，在20世纪60年代后期广泛流行，直到今天 $\mu\text{A}741$ 仍是电子学科中讲解集成运算放大器原理的典型器件。 $\mu\text{A}741$ 在国内型号为F007，它是一种性能较好、放大倍数较高、具有内部补偿的通用型集成运算放大器，是一个单运算放大器，即一个芯片内只有一个运算放大器，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 $60\Omega$ ；开环差模电压放大倍数大于 $106\text{dB}$ 。 $\mu\text{A}741$ 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。

2) 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（3~30V）的单电源下工作，也可以在双电源下工作（ $\pm 1.5\sim\pm 15\text{V}$ ）。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。

3) LM358 LM358是双运算放大器，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（3~30V）和双电源工作方式（ $\pm 1.5\sim\pm 15\text{V}$ ）。

4) NE5532 NE5532内含有两个独立运算放大器，它是一种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（ $\pm 3\sim\pm 20\text{V}$ ）。增益带宽积GBW为 $10\text{MHz}$ ，

转换速率的典型值为  $9\text{V}/\mu\text{s}$ ，等效输入噪声为  $5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} @1\text{kHz}$ 。

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

上述 5 个集成运算放大器均属于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

1) **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  $10^4\sim 10^{12}\text{M}\Omega$ 。

2) **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。

3) **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  $\text{V}/\mu\text{s}$ 。

4) **低功耗型** 对于这类集成运算放大器，工作在高电源电压时，要求最大功耗不大于  $6\text{mW}$ ；或工作在低电源电压（如  $1.5\sim 4\text{V}$ ）时，要求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  $0.6\text{mW}$ ，有的产品已达微瓦级。

5) **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  $300\text{V}$  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，通常可将集成运算放大器看成理想的运算放大器来进行近似分析。

理想化的条件主要是：

(1) 开环差模增益（放大倍数） $A_{\text{od}} \rightarrow \infty$ ；

(2) 差模输入电阻  $R_{\text{id}} \rightarrow \infty$ ；

(3) 输出电阻  $R_{\text{o}} \rightarrow 0$ ；

(4) 上限截止频  $f_{\text{H}} \rightarrow \infty$ ；

(5) 共模抑制比  $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$ ；

(6) 单位增益带宽  $f_{\text{c}} \rightarrow \infty$ ；

(7) 失调电压  $U_{\text{os}}$ 、失调电流  $I_{\text{os}}$  和它们的温漂均为 0，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,具有高差模电压放大倍数、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。

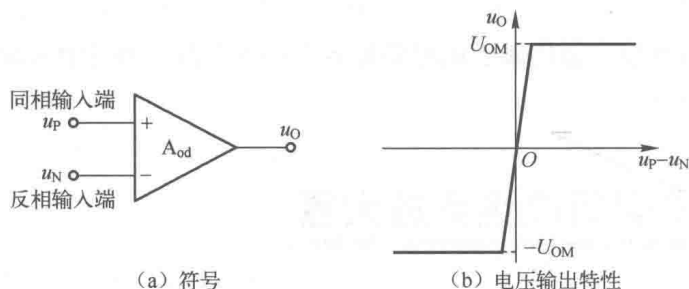


图 1-1 集成运算放大器的符号和电压输出特性

集成运算放大器的输出电压  $u_O$  与输入电压  $(u_P - u_N)$  之间的关系曲线称为电压输出特性,即

$$u_O = f(u_P - u_N) \quad (1-1)$$

对于正、负两路电源供电的集成运算放大器,电压输出特性如图 1-1 (b) 所示。从电压输出特性曲线可以看出,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,故称其放大倍数为开环差模电压放大倍数,记作  $A_{od}$ ,因而当集成运算放大器工作在线性区时,则

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N) \quad (1-2)$$

通常  $A_{od}$  非常高,可达几十万倍,因此集成运算放大器电压输出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

如图 1-2 所示为理想集成运算放大器性能测试图,图中  $U_1$  为理想集成运算放大器,其反相输入端接地,同相输入端通过一限流电阻  $R_1$  接输入信号 INPUT,在输出端的 OUTPUT 处输出结果。

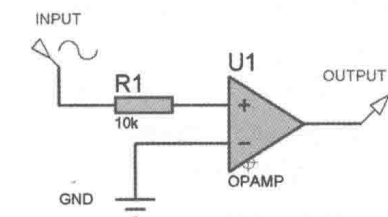


图 1-2 理想运算放大器性能测试图

先给 INPUT 输入一幅度为  $\pm 15\mu\text{V}$ 、频率为 1kHz 的交流电压信号,用 Proteus 图形仿真功能,可以绘出电路的输入/输出电压关系图,如图 1-3 所示。由图 1-3 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 1 000 000 ( $10^6$  或 120dB)。

再给 INPUT 输入一幅度为  $\pm 20\mu\text{V}$ 、频率为 1kHz 的交流电压信号,用 Proteus 图形仿真



功能，绘出电路的输入/输出电压关系图，如图 1-4 所示。由图 1-4 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。

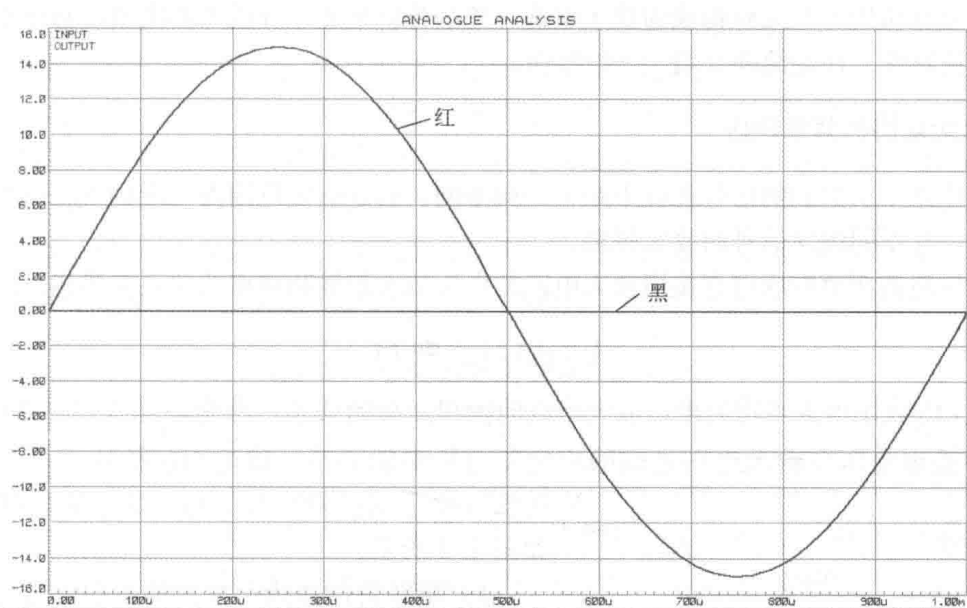


图 1-3 理想集成运算放大器性能测试结果图 (1)

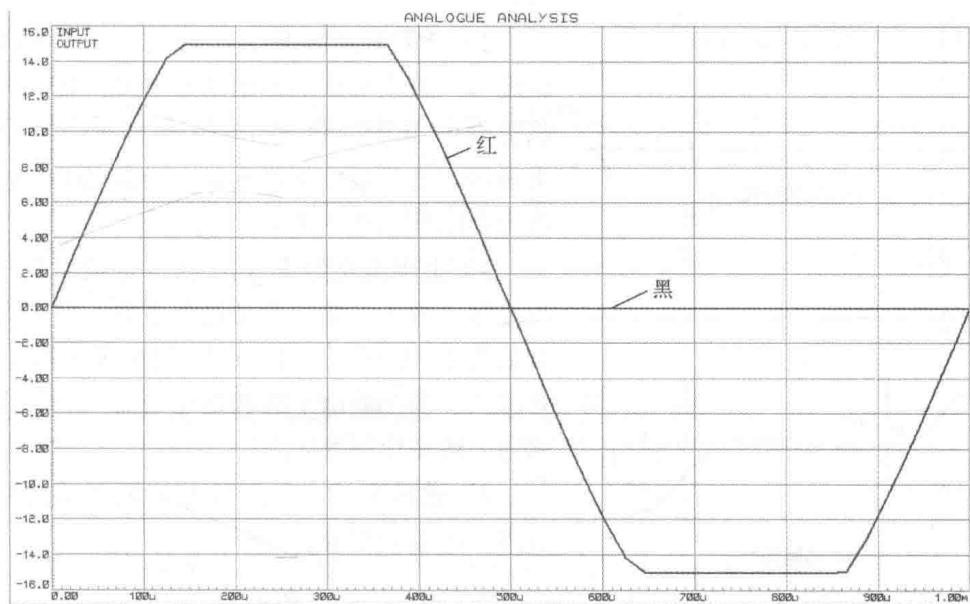


图 1-4 理想集成运算放大器性能测试结果图 (2)

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

这里说的是理想集成运算放大器的性能，实际集成运算放大器的性能指标均为有限值。随着新型集成运算放大器的不断出现，性能指标会越来越接近理想集成运算放大器。