

---

# 集成运算放大器 及其应用

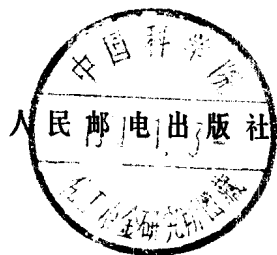
---

孔有林 编著

人民邮电出版社

# 集成运算放大器及其应用

孔有林 编著



## 内 容 提 要

本书是为了帮助具备一定晶体管电路基础知识的读者系统地了解集成运算放大器的结构、性能、参数测试和应用而编写的。书中介绍了国内外典型通用集成运算放大器及新型高性能集成运算放大器，系统地分析了集成运算放大器的应用基础理论，引用了大量国内外集成运算放大器在各种电子电路及各技术领域应用的实例及其原理分析。可供从事电信、无线电技术、计算技术、自动控制、电子医疗等工作的工程技术人员、工人阅读。也可供高等学校有关专业师生参考。

## 集成运算放大器及其应用

孔有林 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1980年8月第一版

印张：19 20/32 页数：314 1980年8月河北第一次印刷

字数：520 千字 印数：1—20,300 册

统一书号：15045·总2343·无687

定价：1.85 元

## 序 言

六十年代初期发展起来的半导体集成电路是近代科学技术的重大成果之一，它的出现又大大地推动了现代科学技术的发展。首先发展的是用于数字计算机的数字集成电路。以后，随着电子技术各个领域对集成化的要求以及集成电路制造工艺的改进，又出现了以差动放大器为主体的线性集成电路。最初制成的这种线性集成电路的基本放大器主要是用作模拟计算机的运算放大器，所以被称为集成运算放大器，简称集成运放。其实它能用来处理各种模拟信号，完成放大、振荡、调制和解调、模拟信号的相乘、相除、相减和相比较等等功能，而且还广泛地用于脉冲电路。因此，集成运放这个名称早已名不符实了，但却一直沿用到今天。

集成运放的特点之一是它具有集成化的差动输入级。因此，它不但输入阻抗很高，漂移小，而且用集成化的办法能把差动输入级做得非常对称，两个差动输入端做得非常靠近。由于靠近，外界感应到两输入端的干扰信号是幅度相等、相位相同的共模信号，而对称的差动放大级对共模干扰信号具有很强的抑制能力。另外，由于集成度较高，还可以设置温控、稳压、恒流、自动增益控制等辅助电路。集成运放由于具有这种输入阻抗高（可达 $10^{13}$ 欧姆）和抗干扰能力强的特性，所以用来处理微弱信号有独特的优点。

集成运放的特点之二是开环增益非常高（高达几万倍到几百万倍）。这样，在应用时可以加上深度负反馈，因而它具有深负反馈放大器的一系列的优点，如增益稳定、非线性失真小等等。更重要的是能在它的深负反馈回路中接入各种线性或非线性的元件，以构成具有各种各样特性的电路。这也是集成运放能够广泛地用于电子电路各个领域的原因之一。目前除了高频大功率电路外，凡是晶体

管分立元件组成的电子电路都能用以集成运放为基础的电路来代替。而且还能用集成运放组成性能非常独特、用晶体管分立元件不能作到的电子电路。随着半导体集成电路工艺和设计及其在无线电技术中应用的发展，在电子技术中可能会出现以集成运放为基础的电路设计、制作技术的新领域。这就是人们所议论的“集成运放电子学”技术。

集成运放的特点之三，是集成化带来的可靠性高、寿命长、体积小、重量轻和耗电少等优点。这正是弹载和星载电子设备所希望的可贵特性。

此外，采用集成运放还能使设备的性能和经济效果大大提高。由于使用了集成运放，电路中的分立元件数量大大减少，可靠性相对提高；由于体积和重量的减少，设备的力学性能也得以提高。同时还使设备的电子系统的设计、制作和调试简化，维修简便。

在测量和自动控制系统中，经常要把物理、化学和生物等非电量通过传感器变成微弱的电信号加以放大，并把这种模拟信号变成数字信号（模数变换），进行数据处理和显示。然后再把数字信号变成模拟信号，返回去进行调整和控制。在这类设备中的弱信号放大、模数和数模变换，如果采用集成运放，将会提高设备的精度，并使设备大为简化。所以，集成运放也是数字电子设备中的一种重要的电子器件。

下表列出了集成运算放大器目前在电子电路中的各种应用。由表可见，集成运放可以完成许许多多的功能。因而它在各个领域已经得到了广泛的应用。举例说，集成运放已经成功地用于工业自动控制装置、电子医疗设备、地震测试设备、天文测量设备、无线电测量设备、移动电话、数字通信、计算技术以及航天电子系统等等领域。

35567

集成运算放大器在电子电路中的应用

	类 型	电 路 功 能		类 型	电 路 功 能	
线 性 信 号 处 理	放 大	直流放大	信 号 变 换	调 制 器 解 调 器	幅度调制	
		交流放大(音频放大)			频率调制	
		视频放大			相位调制	
		功率放大			调频解调	
		调谐放大			同步调幅解调	
		增益可变放大			相位检波	
		自动增益控制放大				
	模拟运算	加法、减法、微分、 积分运算		频 率 变 换	倍 频	
	记 忆	模拟记忆			分 频	
	滤 波 器	有源滤波器		变	模 数 与 数 模 变 换	模数变换
		有源阻抗变换器				数模变换
		负阻变换器			电 压 $\leftrightarrow$ 频 率	电压频率变换
		迴 转 器				频率电压变换
	放 大	限幅放大		正 弦 波 产 生 器	固定频率振荡器	
幅度比较		精密振荡器				
对数和反对数放大		变频振荡器				
有效值放大		脉冲产生器				
绝对值放大		功 率 变 换	直流——交流变换			
			直流——直流变换			
模 拟 运 算	乘法和除法运算	稳 定 措 施	稳压电路			
	其他非线性运算		稳流电路			
模 拟 控 制	模拟控制					

目前,集成运放的发展是由通用到专用(如集成比较器),由低速到高速。一些特别强调一项和几项技术指标的新产品也在不断出现,如低漂移、低功耗、低噪声以及大功率和高电压输出的集成运放,还有为得到高输入阻抗的场效应管输入级集成运放以及输入与输出级之间的绝缘电阻为 $10^{13}$ 欧的集成隔离运放等。

集成运放目前存在的缺点,主要是由于半导体集成电路制作工艺的特点所造成的。例如,要制作高频大功率的集成运放比较困难;集成运放的制作工艺复杂,产品一致性差,等等。但事物总是不断发展,不断完善的。集成运放存在的不足之处必将在不断的发展中得到改善。

本书是为了帮助具备一定晶体管电路基础知识的读者系统地了解集成运算放大器的结构、性能、参数测试和应用而编写的。书中介绍了国内外典型通用集成运算放大器及新型高性能集成运算放大器,系统地分析了集成运算放大器的应用基础理论,引用了大量国内外集成运算放大器在各电子电路及各技术领域应用的实例及原理分析。可供从事电信、无线电技术、计算技术、自动控制、电子医疗等工作的工程技术人员和工人阅读。也可供高等学校有关专业师生参考。

为了正确地应用集成运放来实现各种电子电路,必须对集成运放的性能和有关参数及其测试有一个明确的了解。所以本书第一、二章着重介绍集成运放内部电路的结构和工作原理,并对集成运放的内部性能和特性参数进行了分析和讨论。为了便于理解,在第一章中首先对国内生产的几种通用集成运放的典型产品作了简单的介绍,使读者对集成运放有一个粗略的了解。另外还介绍了一些测量特性参数的基本原理和方法。

第三章是在对集成运放内部特性认识的基础上,分析集成运放对外部呈现的特性,讨论如何利用和控制这些特性,为应用集成运放打下必要的理论基础。

第四章至第八章是根据集成运放的用途分章节进行分析和讨论

研究的。在每章中，先介绍电路的基本原理，然后通过应用举例来分析电路的各种性能指标，并介绍设计和使用中应注意的问题。大多数应用电路给出了外接电路元件的具体数据，可供读者参考使用。某些应用电路介绍了几种实用电路方案以便进行比较，从而加深对此类应用电路的理解，也便于读者根据实际情况选择使用。

对于大多数读者来说，前三章是必须阅读的，而后面的章节可根据情况选读。因为只有对集成运放的内部性能了解较透澈，才能正确地使用它，充分发挥它的功能。

本书编写过程中，参考了国内外大量资料，结合国内实际生产及应用情况，力图对集成运放的性能、参数测量方法、应用原理及其在各技术领域中的应用情况作一系统而实用的介绍，以求对读者了解和应用集成运放有所帮助。但由于水平所限，书中的缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。在本书编写过程中，曾邑铎、杨士中、刘景麟、林可祥、杨步仪、张帮熙等同志曾给予大力支持、热情帮助，李华金同志对全书进行了审阅定稿，在此特表示深切的谢意。

孔有林

1979年1月



# 目 录

## 序 言

<b>第一章 集成运算放大器及其性能</b> .....	( 1 )
<b>第一节 集成运算放大器概述</b> .....	( 1 )
一、集成运放的基本组成部分 .....	( 1 )
二、几种通用集成运放 .....	( 8 )
三、集成运放的外部接线 .....	( 10 )
<b>第二节 集成运放的特性和参数</b> .....	( 11 )
一、增益、带宽、共模抑制比 .....	( 12 )
二、输入特性 .....	( 14 )
三、输出特性 .....	( 17 )
四、电源特性参数 .....	( 20 )
五、集成运放的噪声 .....	( 21 )
六、集成运放的脉冲特性 .....	( 22 )
<b>第三节 集成运放参数的测试</b> .....	( 22 )
一、电压表和电流表测试法 .....	( 23 )
二、“零电位”放大器综合测试法 .....	( 27 )
三、交流特性、脉冲特性的测试 .....	( 39 )
四、集成电压比较器及其参数的测试 .....	( 46 )
<b>第四节 集成运放性能简介</b> .....	( 51 )
一、低增益通用集成运放 .....	( 51 )
二、中增益通用集成运放 .....	( 51 )
三、高增益通用集成运放 .....	( 54 )
<b>第五节 集成运放的选用</b> .....	( 55 )
一、开环或闭环状态的应用 .....	( 55 )
二、从电路设计角度考虑集成运放性能 .....	( 55 )
三、集成运放的使用环境 .....	( 56 )

四、负载 .....	( 56 )
五、集成运放的电源 .....	( 56 )
六、集成运放的数量 .....	( 57 )
<b>第二章 高性能集成运放</b> .....	<b>( 58 )</b>
<b>第一节 高输入阻抗集成运放</b> .....	<b>( 60 )</b>
一、双极晶体管对输入级集成运放 .....	( 61 )
二、超 $\beta$ 管 ( 穿通管 ) 对输入级集成运放 .....	( 67 )
三、结型场效应晶体管输入级 .....	( 67 )
四、金属氧化物场效应管对 ( <i>MOSFET</i> ) 输入级 .....	( 69 )
五、 <i>CMOS</i> 集成运放 .....	( 70 )
六、提高输入阻抗的几种方法的比较 .....	( 72 )
<b>第二节 低漂移集成运放</b> .....	<b>( 72 )</b>
一、基片温度自动控制措施 .....	( 75 )
二、恰当地选择晶体管的等效偏压 $V_{BE}$ .....	( 75 )
三、斩波稳零式集成运放 .....	( 77 )
<b>第三节 高速集成运放</b> .....	<b>( 83 )</b>
一、小信号和大信号工作状态 .....	( 85 )
二、带宽扩展法 .....	( 87 )
三、发射极串接反馈电阻 $R_E$ .....	( 88 )
四、交叉耦合输入级 .....	( 88 )
五、场效应晶体管输入级 .....	( 89 )
六、双极点电路补偿法 .....	( 90 )
七、前馈补偿法 .....	( 93 )
八、典型高速集成运放简介 .....	( 93 )
<b>第四节 大功率集成运放</b> .....	<b>( 102 )</b>
一、 $\mu A791$ 型大功率集成运放 .....	( 103 )
二、 $3571AM$ 、 $3572AM$ 型大功率集成运放 .....	( 110 )
三、高输出电压集成运放 .....	( 110 )
四、大电流输出集成运放 .....	( 110 )
<b>第五节 低功耗集成运放</b> .....	<b>( 111 )</b>
一、减小功耗的措施 .....	( 112 )

二、X54 (XFC-75) 型低功耗集成运放	( 115 )
第六节 低噪声集成运放	( 118 )
第七节 隔离集成运放	( 120 )
第八节 电流放大(诺顿)集成运放	( 124 )
<b>第三章 集成运放应用的理论基础</b>	( 128 )
第一节 负反馈原理及其应用	( 128 )
一、采用负反馈的优点	( 129 )
二、负反馈对等效输入噪声的影响	( 132 )
三、负反馈在集成运放电路中的应用	( 132 )
第二节 集成运放应用的基础	( 137 )
一、负反馈反相放大电路	( 137 )
二、负反馈同相放大电路	( 143 )
第三节 集成运放的等效电路	( 146 )
一、集成运放的等效电路	( 146 )
二、集成运放等效电路的应用	( 149 )
第四节 实际集成运放的误差	( 153 )
一、因负载和输出阻抗 $Z_o$ 产生的误差	( 153 )
二、因失调电压 $V_{10}$ 产生的误差	( 154 )
三、因同相增益 $K_{CM}$ 产生的误差	( 157 )
四、因开环增益 $K_{0(j\omega)}$ 产生的误差	( 159 )
五、因输入阻抗 $Z_i$ 产生的误差	( 161 )
第五节 稳定性及其判别	( 162 )
一、相移对放大电路的影响	( 162 )
二、稳定性的判定	( 167 )
第六节 集成运放的相位补偿	( 171 )
一、相位补偿的基本原理	( 171 )
二、集成运放的相位补偿	( 174 )
三、闭环补偿法	( 180 )
<b>第四章 集成运放线性电路</b>	( 182 )
第一节 模拟积分电路	( 182 )

一、理想的模拟积分电路	( 182 )
二、 $V_{IO}$ 、 $I_B$ 及其漂移对积分电路的影响	( 182 )
三、集成运放增益和带宽对积分电路的影响	( 183 )
四、积分电路的保持误差	( 185 )
五、几种典型的积分电路	( 187 )
第二节 微分电路	( 191 )
第三节 直流放大器	( 195 )
一、测量放大器的特点	( 195 )
二、使用一只集成运放的直流放大器	( 201 )
三、两只以上的集成运放制作的直流放大器	( 203 )
四、桥式放大器	( 212 )
第四节 交流放大器	( 213 )
一、音频放大电路的高端频率特性	( 214 )
二、反相低通、高通交流放大器	( 215 )
三、同相交流放大电路	( 219 )
四、均衡放大器电路	( 222 )
五、音调调节电路	( 223 )
六、窄带交流放大器	( 225 )
第五节 自动调节器	( 227 )
一、单只集成运放PID调节器	( 229 )
二、串联型PID自动调节器	( 229 )
三、并联型PID调节器	( 234 )
第六节 正弦波振荡器	( 236 )
一、文氏电桥振荡器	( 236 )
二、RC移相振荡器	( 239 )
三、正交移相振荡器	( 240 )
四、双T网络振荡器	( 243 )
五、晶体振荡器	( 244 )
第七节 稳压电源和恒流源电路	( 245 )
一、基准电压源	( 245 )
二、稳压电源电路	( 249 )

---

三、恒流源电路 .....	( 256 )
<b>第五章 集成运放非线性电路 .....</b>	<b>( 259 )</b>
<b>第一节 集成运放限幅电路 .....</b>	<b>( 259 )</b>
一、串联式限幅器 .....	( 259 )
二、并联式限幅器 .....	( 263 )
<b>第二节 绝对值电路 .....</b>	<b>( 273 )</b>
一、理想二极管电路 .....	( 273 )
二、整流电路(绝对值电路) .....	( 274 )
三、相位鉴别电路 .....	( 277 )
<b>第三节 函数发生器 .....</b>	<b>( 279 )</b>
一、线性补偿电路 .....	( 280 )
二、高精度线性补偿电路 .....	( 282 )
三、简单的线性补偿电路 .....	( 286 )
<b>第四节 对数和反对数放大电路 .....</b>	<b>( 289 )</b>
一、对数放大电路 .....	( 289 )
二、反对数放大电路 .....	( 297 )
三、集成化对数和反对数放大器 .....	( 299 )
<b>第五节 乘法和除法运算电路 .....</b>	<b>( 301 )</b>
一、对数反对数运算乘法器 .....	( 301 )
二、平方乘法电路 .....	( 304 )
三、三角波平均值乘法电路 .....	( 305 )
四、时间分隔乘法电路 .....	( 307 )
五、反馈控制式除法器 .....	( 313 )
<b>第六章 有源阻容滤波器 .....</b>	<b>( 318 )</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>( 318 )</b>
<b>第二节 典型有源阻容滤波器 .....</b>	<b>( 320 )</b>
一、低通滤波器 .....	( 320 )
二、高通滤波器 .....	( 323 )
三、带通滤波器 .....	( 324 )
四、带阻滤波器 .....	( 325 )

第三节 无限增益多反馈环型滤波器 .....	( 325 )
一、低通滤波器 .....	( 326 )
二、高通滤波器 .....	( 328 )
三、带通滤波器 .....	( 329 )
四、小结 .....	( 339 )
第四节 压控电压源型滤波器 .....	( 340 )
一、低通滤波器 .....	( 340 )
二、高通滤波器 .....	( 342 )
三、带通滤波器 .....	( 343 )
四、小结 .....	( 347 )
第五节 最大平直型有源RC滤波器 .....	( 348 )
一、低通滤波器 .....	( 349 )
二、高通滤波器 .....	( 359 )
三、带通滤波器 .....	( 360 )
第六节 纹波型有源滤波器 .....	( 363 )
一、低通滤波器 .....	( 364 )
二、高通滤波器 .....	( 369 )
第七节 线性相位型滤波器 .....	( 370 )
一、直接查表设计法 .....	( 371 )
二、查表计算设计法 .....	( 373 )
第八节 元件对有源滤波器的影响 .....	( 374 )
一、集成运放的影响 .....	( 374 )
二、电阻、电容的影响 .....	( 378 )
<b>第七章 集成运放脉冲电路 .....</b>	<b>( 463 )</b>
<b>第一节 脉冲产生电路 .....</b>	<b>( 463 )</b>
一、无稳态多谐振荡器 .....	( 464 )
二、用多个集成运放构成的锯齿波产生电路 .....	( 471 )
三、高精度波形产生电路 .....	( 473 )
四、其他形式的锯齿波和三角波产生电路 .....	( 476 )
五、单稳态多谐振荡器 .....	( 478 )

---

六、双稳态多谐振荡器	( 481 )
七、阶梯脉冲产生电路	( 482 )
第二节 比较电路	( 485 )
一、比较器及其特性	( 485 )
二、比较电路	( 487 )
三、集成化电压比较器的应用	( 496 )
第三节 电压-频率变换电路	( 500 )
一、简单的 $VFC$ 电路	( 500 )
二、恢复型 $VFC$ 电路	( 501 )
三、反馈式 $VFC$ 电路	( 506 )
四、恒流源恢复型 $VFC$ 电路	( 508 )
五、集成化电压-频率变换器简介	( 513 )
第四节 取样保持电路	( 516 )
一、改善电路精度的措施	( 518 )
二、提高电路速度的措施	( 523 )
第五节 其他脉冲电路	( 526 )
一、调制解调电路	( 526 )
二、分频和倍频电路	( 530 )
三、移频键控单音振荡器	( 532 )
四、时间间隔比直流分压器	( 533 )
第六节 伺服电机控制电路	( 537 )
一、开关控制方式	( 537 )
二、在仿型控制系统中的应用	( 539 )
三、直流伺服电动机控制电路	( 542 )
第八章 数模与模数变换电路	( 546 )
第一节 数模变换器(解码器)	( 547 )
一、开关电路	( 547 )
二、梯子型或 $R-2R$ 型电阻网络数模变换器	( 553 )
三、权电阻网络数模变换器	( 559 )
四、串行输入数模变换器	( 564 )
五、非线性数模变换器	( 565 )

---

第二节 模数变换器 .....	( 566 )
一、计数式模数变换器 .....	( 567 )
二、反馈式模数变换器 .....	( 570 )
三、高速模数变换器 .....	( 577 )
第三节 数字测量技术 .....	( 583 )
一、极性变换电路 .....	( 584 )
二、测量范围变换电路 .....	( 586 )
三、电流电压变换器 .....	( 588 )
四、阻抗电压变换电路 .....	( 590 )
附录 I 契比雪夫型滤波器设计补充 .....	( 592 )
附录 II 国外集成VFC性能 .....	( 594 )
附录 III 国产集成运放参数表 .....	( 595 )
附录 IV 国内外运算放大器对查表 .....	( 610 )



# 第一章 集成运算放大器及其性能

运算放大器是电子模拟解算装置的基本单元。它的基本功能是用来作加法、减法、乘除法、积分、微分等运算。除此之外，在运算放大器的负反馈电路中接入不同的外接元件（二极管、三极管、RC 网络以及阻值与电压成非线性关系的电阻等）可组成不同的电路，用在精密测量设备中。

随着半导体集成电路技术的发展，集成运放的品种和产量越来越多，质量不断提高，成本逐渐降低，使用范围越来越广。它已成为一个多用途的新型电子单元。因此，对于电子电路的设计和制作者，了解集成运放是十分必要的。本章将对通用型集成运放的结构、各种技术参数及其测试方法进行讨论。

## 第一节 集成运算放大器概述

### 一、集成运放的基本组成部分

集成运放通常由输入级放大电路、第二级放大电路、输出级等三个基本部分组成。对于要求较高的集成运放，则还要增加有关部分，例如：温控电路、保护电路、稳压和稳流电路、内部补偿和温补电路、偏置电路等。下面对集成运放的基本组成部分作简单的说明。

#### 1. 输入级放大电路

对直放大器的输入级，通常要求失调电压小、输入偏置电流小和温度漂移小。在一般情况下，运算放大器的输入级均采用匹配