
集成运算放大器 及其应用

(修订本)

孔有林 编著

人民邮电出版社

集成运算放大器及其应用

(修订本)

孔有林 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是为帮助具备一定电子电路基础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。本书在介绍了集成运放的单元电路后，分章讲述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种技术领域中的应用的实例及原理分析。

修订版中除增写了第一章外，还改写了初版中大部分章节的内容。本书可供从事电子技术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阅读。

集成运算放大器及其应用（修订本）

孔有林 编著
责任编辑 徐修存

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 1988年3月第 一 版
印张：27 页数：432 1988年3月河北第1次印刷
字数：717千字 插页：1 印数：1—5 000册

ISBN7115—02343—3/TN

定价：5.50元

修 订 序

《集成运算放大器及其应用》一书结合国内外集成运放的发展、研制、生产和应用情况，由浅而深地向读者介绍了国内外各种典型通用型集成运放和高性能集成运放的结构、内部电路、性能、技术参数及其测试，讨论了集成运放应用的理论基础和集成运放在各个方面的应用，引用了大量国内外集成运放的典型实用电路。

这本书一九八〇年出版以后，受到了读者的关注。尽管该书对读者学习和应用集成运放有一定的帮助，但基于当时的条件和本人的水平，书中不足之处甚多。随着集成电路技术的发展，本书的内容就显得不够全面，在应用方面显得有一定的局限性。

几年来我国集成电路技术有了进一步发展，集成电路品种增多，质量提高，产品的成本和价格不断地降低。目前国内不仅可生产通用产品，还可生产专用产品，集成运放应用范围愈来愈宽。

在我国作为模拟集成电路的主要分支的集成运放发展很快，其中CMOS集成运放发展得更快。国内除生产了与国际通用标准完全一致的典型通用集成运放CF702、CF709、CF741、CF747等产品外，还生产了以下高性能集成运放。

1. 宽带高速集成运放。例如CF715、CF318、CF772以及F050、F051、F052、F054、F055等。

2. 高输入阻抗集成运放。

(1) BI—MOS兼容的CF3140、CF3130以及F072等。

(2) BI—FET兼容的CF081、CF0022以及TD—04、TD—05、5G28、5G353、BG313、F070、F073等。

3. 高精度、低漂移集成运放。它包括CF508、CF254、CF154、CF725以及F030、F031、F032、F033、F034等。

4. 低功耗和微功耗集成运放。除原生产的FC54、5G26类外，还有CF253以及F011。另外还有微功耗集成运放F3078。

5. 跨导集成运放。它包括CF3080以及CH3080等。

6. 多重电压放大式集成运放。

(1)多重电压放大式集成运放。例如CF747、CF1558、CF124等。

(2)多重电流放大式集成运放。例如CF3401、CF3900等。

7. 高压输出集成运放。它包括有CF1536/1436、FC10、BG315等。

3. 集成电压比较器

(1)ECL工艺集成电压比较器有E1650、E1651、J685等。

(2)BI工艺集成电压比较器有J630、J631等。

(3)CMOS工艺集成电压比较器有5G14574、CH4574等。

9. 双重运放和双重电压比较器有CH4575、5G14575等。

除前述集成运放和集成电压比较器外，与其相关的还有一些模拟集成电路。例如集成模拟乘法器CF1595和CF1596等；集成稳压电源W723、W104、W105、W1511等。还有诸如电压频率变换器BG382、集成锁相环E562、E565、J691、集成数模和模数变换器DG7106、5G14433、FADC0808以及FDAC0808、5G7200等。

为了有利于发展我国的集成电路技术，推广应用集成电路，我国开展了集成电路的标准化、系列化的工作。集成运放采用国际通用技术标准，产品的结构、参数指标、管脚排列都与国际标准相同。

鉴于以上情况，笔者对本书进行了修订。为了便于读者学习和应用，本书在以下几个方面进行了修改。

集成运放的品种繁多，然而其内部电路结构有很多相似之处，特别是基本单元电路更是这样。为了易于了解各种集成运放的电路结构、基本单元以及内部具体电路，修订版中增加了集成运放基本单元电路一章。这一章着重从物理意义出发，较为系统地介绍集成

运放基本单元电路，分析其工作原理以及在集成运放中的应用。

由于采用国际标准，因此新产品与过去生产的有外调零、外接补偿电容的集成运放相比，虽内部电路大致一样，但管脚的数量和排列形式都发生了变化。在修订版中将采用现行的国际通用技术标准系列集成运放的内部电路和管脚排列，同时保留了适用的集成运放。

与晶体管电路分析一样，集成运放应用电路的分析也有赖于集成运放等效电路。修订版中，对近十种集成运放等效电路中较为典型的三种集成运放等效电路进行较为详细地分析讨论，并把它用于典型应用电路传输函数表达式的分析推导。

高性能集成运放是应用很广的典型集成运放，本书结合国内生产情况介绍了部分高速、高阻、高精度低漂移、高压、低功耗集成运放及其应用。

从电路结构上看，集成模拟乘法器与集成运放的结构相似，在运算和控制电路应用中优于集成运放，而且应用时往往两者要配合应用，为此修订版中将介绍国产集成模拟乘法器及其应用。本书还增加了介绍单片集成稳压电源应用的内容。

为便于读者查阅，本书对初版的《国产集成运放参数表》和《国内外集成运放对查表》进行了修改。

在本书修订过程中不少同志提出了宝贵意见，刘景麟同志给予了热情帮助，李华金同志审阅了书稿，在此特表示感谢。

作者 1984.12

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。

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

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
		谐波放大			同步调幅解调
		增益可变放大			相位检波
		自动增益控制放大			倍 频
	模拟运算	加法、减法、微分、积分运算		频率变换	分 频
	记 忆	模拟记忆			频率变换
	滤 波 器	有源滤波器		变	模 数 与 数 模 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		
逆转器			频率电压变换		
放 大	限幅放大	换	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	
模拟运算	乘法和除法运算			直流—直流变换	
	其他非线性运算	稳 定 措 施		稳压电路	
模拟控制	稳流电路				

运放，还有可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^{18} 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中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，从而加深对这类应用电路的理解，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，曾岳铎、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。

作者

1979年1月

目 录

修订序

序 言

第一章 集成运算放大器单元电路	(1)
第一节 集成运放的基本组成部分	(1)
一、差动输入放大级电路	(2)
二、中间电压放大级电路	(2)
三、输出级电路	(3)
四、偏置电路	(8)
第二节 差动放大电路	(4)
一、差动放大器的工作原理	(4)
二、提高共模抑制能力	(11)
三、差动放大电路在集成运放电路中的应用	(15)
第三节 恒流源电路	(24)
一、最简单的恒流源电路	(25)
二、基本恒流源电路	(26)
三、比例恒流源电路	(28)
四、小电流恒流源电路	(30)
五、带缓冲级的恒流源电路	(31)
六、温度补偿恒流源电路	(33)
七、PNP管基本恒流源电路	(35)
八、多集电极横向PNP管恒流源电路	(36)
九、场效应晶体管恒流源电路	(37)
第四节 有源负载	(40)
第五节 电平移动和阻抗变换电路	(42)
一、恒流源电平移动电路	(43)

二、横向PNP型晶体管电平移动电路	(44)
三、稳压管电平移动电路	(46)
第六节 双端—单端变换电路	(47)
一、并联电阻负反馈双端—单端变换电路	(47)
二、有源负载双端—单端变换电路	(49)
三、电流负反馈双端—单端变换电路	(51)
四、PNP管双端—单端变换电路	(53)
第七节 输出级和保护电路	(54)
一、射极跟随器输出级	(54)
二、推挽输出级电路	(56)
三、互补推挽输出级电路	(58)
四、集成运放内部保护电路	(61)
第二章 集成运算放大器及其性能	(64)
第一节 通用型集成运放	(64)
一、CF702通用Ⅰ型集成运放	(64)
二、CF709通用Ⅰ型集成运放	(66)
三、CF741通用Ⅲ型集成运放	(69)
四、F004(5G23)通用型集成运放	(71)
五、8FC2Ⅰ通用型集成运放	(73)
六、XFC2通用型集成运放	(74)
七、BG305型高增益集成运放	(75)
八、CF747型通用双集成运放	(77)
第二节 集成运放的特性和参数	(78)
一、频率特性、增益、带宽、共模抑制比	(78)
二、输入特性	(81)
三、输出特性	(87)
四、电源特性参数	(92)
五、集成运放的噪声	(93)
六、集成运放的脉冲特性	(93)
第三节 集成运放参数的测试	(94)
一、电压表和电流表测试法	(94)

二、“零电位”放大器综合测试	(102)
三、交流特性、脉冲特性的测试	(116)
第四节 集成电压比较器	(122)
一、概述	(122)
二、典型集成电压比较器	(124)
第三章 高性能集成运放	(127)
第一节 高输入阻抗集成运放	(129)
一、双极型晶体管对输入级集成运放	(131)
二、结型场效应管输入级集成运放	(132)
三、CMOS集成运放	(140)
第二节 高速集成运放	(149)
一、提高集成运放的转换速率	(151)
二、高速集成运放	(158)
第三节 低漂移集成运放	(174)
一、基片温度自动控制措施	(177)
二、设计和工艺上的综合措施	(178)
三、低漂移集成运放	(181)
四、斩波稳零式集成运放	(188)
第四节 低功耗集成运放	(203)
一、减小功耗的措施	(204)
二、CF253型低功耗集成运放	(209)
三、XFC-75型低功耗集成运放	(211)
四、微功耗集成运放F3078T/F3078AT	(214)
第五节 高压大功率集成运放	(216)
一、 μ A791型大功率集成运放	(216)
二、3571AM、3572AM大功率集成运放	(224)
三、高输出电压集成运放	(224)
四、大电流输出集成运放	(227)
第六节 低噪声集成运放	(227)
第七节 隔离集成运放	(230)

第八节 电流放大式集成运放	(234)
一、LM3900型电流放大式集成运放	(234)
二、LM3900集成运放的应用	(238)
第九节 CF124型集成运放	(247)
第十节 CF3080型跨导型集成运放	(248)
第四章 集成运放应用的理论基础	(252)
第一节 负反馈原理及其应用	(252)
一、采用负反馈的优点	(253)
二、负反馈对等效输入噪声的影响	(256)
三、负反馈在集成运放电路中的应用	(257)
第二节 集成运放应用的基础	(260)
一、负反馈反相放大电路	(260)
二、负反馈同相放大电路	(268)
第三节 集成运放的等效电路	(271)
一、集成运放等效电路	(271)
二、等效电路(I)的应用	(278)
第四节 实际集成运放的误差	(288)
一、因负载 Z_L 和输出阻抗 Z_o 产生的误差	(289)
二、因输入失调 V_{IO} 、 I_{IO} 产生的误差	(290)
三、因同相增益 K_{CM} 产生的误差	(294)
四、因开环增益 $K_o(j\omega)$ 产生的误差	(295)
五、因输入阻抗 Z_i 产生的误差	(297)
第五节 稳定性及其判别	(298)
一、相移对放大电路的影响	(299)
二、稳定性的判定	(303)
第六节 集成运放的相位补偿	(308)
一、相位补偿的基本原理	(308)
二、集成运放的相位补偿	(312)
三、闭环补偿法	(319)
第五章 集成运放线性电路	(321)
第一节 模拟积分电路	(321)

一、理想的模拟积分电路	(321)
二、 V_{IO} 、 I_B 及其漂移对积分电路的影响	(322)
三、集成运放增益和带宽对积分电路的影响	(323)
四、积分电路的保持误差	(324)
五、几种典型的积分电路	(325)
第二节 微分电路	(332)
一、简单微分电路	(332)
二、阻尼微分电路	(333)
三、典型微分电路	(334)
第三节 直流放大器	(337)
一、测量放大器的特点	(337)
二、使用一只集成运放的直流放大器	(344)
三、使用两只以上的集成运放制作的直流放大器	(348)
四、桥式放大器	(358)
第四节 交流放大器	(359)
一、放大电路的高端频率特性	(360)
二、单电源集成运放交流放大电路	(361)
三、集成运放交流放大电路	(365)
四、均衡放大器电路	(368)
五、音调调节电路	(370)
六、窄带交流放大器	(372)
第五节 自动调节器	(374)
一、单只集成运放PID调节器	(376)
二、串联型PID自动调节器	(377)
三、并联型PID调节器	(383)
第六节 正弦波振荡器	(384)
一、文氏电桥振荡器	(385)
二、RC移相振荡器	(389)
三、正交移相振荡器	(389)
四、双T网络振荡器	(392)
五、晶体振荡器	(393)

第七节	稳压电源和恒流源电路	(394)
第八节	集成稳压源W723及其应用	(403)
第九节	斩波稳零式放大电路	(428)
第六章	集成运放非线性电路	(433)
第一节	集成运放限幅电路	(433)
一、	串联式限幅器	(433)
二、	并联式限幅器	(437)
第二节	绝对值电路	(447)
一、	理想二极管电路	(448)
二、	整流电路(绝对值电路)	(448)
三、	相位鉴别电路	(453)
第三节	函数发生器	(456)
一、	线性补偿电路	(457)
二、	高精度线性补偿电路	(460)
三、	简单的线性补偿电路	(463)
第四节	对数和反对数放大电路	(468)
一、	对数放大电路	(468)
二、	反对数(指数)放大电路	(477)
三、	集成化对数和反对数放大器	(479)
第五节	乘法运算电路	(481)
一、	差动放大式模拟乘法电路	(482)
二、	集成模拟乘法器	(490)
三、	集成模拟乘法器BG314的应用	(492)
四、	时分乘法电路	(504)
第七章	有源阻容滤波器	(509)
第一节	概述	(509)
第二节	典型有源阻容滤波器	(510)
一、	低通滤波器	(511)
二、	高通滤波器	(514)
三、	带通滤波器	(515)