

集成运算放大器应用手册

[美] W. G. 荣格 著

张熠中 姚朝亮
张爱珍 黄立宏 译

世界图书出版公司

集成运算放大器应用手册

〔美〕 W. G. 荣格 著

张熠中 姚朝亮 译

张爱珍 黄立宏

刘德培 校

世界图书出版公司

1990

内 容 简 介

本书介绍现代线性集成运算放大器的设计应用,深入浅出地论述了集成运放的基本工作原理与电路系统的设计基础。着重介绍如何才能更有效地应用集成运放,以便更充分发挥器件的技术性能。本书内容包括了线性电路领域里最新产品的设计和应用技术,对近十年来的先进工艺,也有启发性论述。

主要内容包括:集成运放的发展过程,调零与频率补偿技术,信号处理技术,模拟乘法器基础,比较器,波形发生电路,积分与微分电路及电压调整器等。

本书对电子线路、仪器仪表及自动化系统的广大工程技术人员,高等院校电子、自动化专业或其他有关专业的师生,对从事线性运放研制与生产的技术人员,都有重要参考价值。

Walter G. Jung

IC OP-AMP COOKBOOK

Haward W. Sams & Co., Inc.

集成运算放大器应用手册

〔美〕W. G. 荣格 著

张熠中 姚朝亮
张爱珍 黄立宏 译

刘德培 校

责任编辑 李宗慧

*

世界图书出版公司出版

北京朝阳门内大街 137 号

北京顺义燕京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年7月第一版 开本: 850×1168 1/32

1990年7月第一次印刷 印张: 18.625

印数: 0001—3,200 字数: 456,000

ISBN 7-5062-0755-9/TN-5

定价: 12.40 元

译者序

随着微电子技术的发展，特别是线性集成电路大量投放市场，人们对电子设备可靠性的要求愈来愈高，迫使人们不得不把体积大、可靠性差的分立器件电路改用集成电路。因此摒弃传统的晶体管线路的设计方法，改用集成运放是一个带挑战性的发展趋势。线性集成电路品种浩繁，性能迥异，对通晓常规设计的不少技术人员来说，从器件的技术手册中选择具体合适的器件，往往有无从下手之苦。本书在近代集成运放的工程应用方面，从某种意义上讲，是填补了一项空白。

本书是 W. G. 荣格 (Walter G. Jung) 所著的《集成运算放大器应用手册》(IC Op-Amp Cookbook) 的第二版。作者独具风格地、用通俗易懂的笔调论述了美国各大公司最有代表性的集成运放的具体应用。作者选择的器件，都是当今工业界普遍承认的著名品种，论述的范围包括器件本身结构和系统设计。对于某种特定应用，如何选择最佳的器件，以及如何正确使用才能发挥或得到最大的经济效益颇有指导作用。本书的出版，对推动集成运放在我国的普遍应用，会起到一定的作用。

本书的序言，第 1 ~ 2 章由张熠中翻译；第 3 ~ 6 章由姚朝亮翻译；第 7 ~ 10 章由张爱珍翻译；附录部分由黄立宏翻译；刘德培对全书进行了全面的审校。

由于译、校者学识有限，译文难免有谬误之处，敬请读者批评指正。

译、校者

第一版序言

本书还在酝酿的时候，就出版了好几种有关运算放大器的教科书和手册。其中不少著作确实受人欢迎。读者还会发现，本书就曾参考过这些著作的有关章节。我们不想贬低前人的成就，但可以这样说，尚没有一本书明确而全面地深入论述集成运算放大器以及其特定标准器件的应用。本书正是从这点出发，旨在适当填补在这一方面现有文献的空白。

由于各人的经历与工作环境不同，每个人往往会以略微不同的方法来处理设计问题。然而，绝大多数人在解决这些问题时，都要遵循某些基本准则。放大器的使用趋势是面向集成运放，并且在为数众多的现有的器件型号中，有许多可以满足绝大多数应用需要的特殊标准器件。考虑到集成运放特有的经济性与广泛的吸引力，本书打算论述在各种各样电路中，如何才能最有效地运用集成运放的有关事项。本书定名为《集成运算放大器应用手册》，就是为了表达这个思想。阅读本书以后，读者还会发现，本书不仅是一本应用手册，还包括普遍的应用原理，以及许多有关的理论根据。

只要浏览一下本书在这种构思下对原理方面的讲述，就会有 助于评价本书对各界读者的价值。一本阐述集成运放应用的书，一定要满足某些基本要求，其中极需考虑的两个问题是体例和内容——谈什么和怎样谈最好。在论述具体内容以前，谈谈有关体例的选择还是必要的。这里所说的“体例”一词，不是语法意义上的文体，而是本书应当写成什么水平。作者确信，对大多数读者来说，讲求实际应用的内容比纯粹的理论更有用。所以，虽然本书也谈理论问题，但重点放在用理论来解决实际应用问题上。在集成运放的实际领域中，人们最关注的是使器件按预定要求进

行工作的细节，而不是使方程平衡。因此，注意从使用者的立场出发，切实地讨论问题，目的是引起从大学生、技术人员到设计工程师等程度不同的读者的兴趣，并希望能满足所有这些人的需要。显然，写成一本面面俱到的教材是不现实的。但本书在论述对所有读者都有意义的问题时，尽可能做到条理清晰、通俗易懂，以使这本书的应用范围更趋广泛。

本书的内容也是以使这本书具有广泛的吸引力为前提的。自然，本书包括了象 709、101 和 741 等著名的标准运放器件。然而，本书的范围并不限于通用型器件，还包括有其他专用型器件（这些器件的某些专用性能指标都是最佳的）。书中选用的专用器件也都是标准的型号，这一点可由工业界的广泛认可而得到证实。

由于书中所选择的器件品种齐全，因此所讨论的应用范围十分广泛，而且具有几乎可以满足任何特定标准的最佳性能。这种因素会使那些想用运放获得高性能电路的设计师们感兴趣。统观全书，作者讨论的主要内容是：指明适合某种特定应用的最佳器件，以及使用该器件应当注意的事项（例如：速度、精度、直流稳定性、功率消耗和其他性能参数等）。

给出总的构思之后，还有一个对线路理论讨论普遍适用的问题。一本应用方面的著作，可供不同读者在各种程度上使用。对特殊技术没有经验的人也许想较详细地学习电路和理论，他们需要补充有关的基础知识，因此，书中一般都列举了适当的参考文献，供进一步阅读参考。另外一些读者，可能对实现某种特定功能的电路感兴趣，因而只需要对本书正文有最基本的了解即可。对这一部分人，书中备有注释完善的图表，图表中有各种数据和改进意见。根据需要，书中还在有关部分，给出了足以概括电路功能的、恰当的设计方程。

W. G. 荣格

第二版序言

本书的初版序言总的来看同样完全适用于本新版。但是，新版除保留初版的宗旨外，重点对以下几个方面做了若干修改。

在保留初版的基本风格和结构的同时，第二版大大地扩充了器件的品种范围，使之与集成电路技术的发展水平相适应。本书最初几个章节已经反映了这个论点。因为在这些章节中，对范围宽广的全部单一组态和多重组态的双极型和FET型运放，以及各种参数性能，统统进行了描述。尽管由于器件品种不断地增加，不可能对它们进行全面介绍，但这一部分的不少内容，对于人们选择合适的器件都是有利的。

本书的应用部分，在章节安排上作了少许修订，但在应用的范围方面，作了大量补充。从第4章到第10章的内容依次为：电压和电流调整器；信号处理；对数和乘法器技术；放大器技术；比较器；积分器和微分器；信号发生器。对于上述这些应用，无论是在深度和广度方面，还是在所选用的器件的适用性方面，均作了适当修正，以期反映最新的技术水平。

我们已将初版中有关“音频”和“特殊器件”的论述扩充为两个独立的版本，因而，在这本书中将着重研究更带普遍性的应用问题。

第二版还包括有一个附录。详述了各个器件制造厂家的器件型号及其资料来源，并给出选择器件品种所用的数据表格。

W. G. 荣格

引言和历史背景

在讨论现代运放*之前，我们应当首先回顾一下运放究竟是怎样一种电路这个最基本的事实。我们分两步来做这件事：（1）讨论在理想情况下，运放是怎样一种电路；（2）讨论在集成电路领域内，实际的运放又是怎样一种电路。

在许多应用中，理想运放和实际（非理想）运放之间的工作情况几乎没有什么差别，因而在一切实际应用中，可以不考虑两者间的差别。在另外一些应用中，这种差别虽很微小，但却可以测量出来。通过仔细选择器件型号，并优化可控参数，往往能将器件的全部性能加以改进。所以，这就要求我们既要掌握运放的基本概念，又要对现时的专用器件有所了解。

运放的最早概念来源于模拟计算机领域。早在 20 世纪 40 年代，模拟计算机就使用了运放技术。运算放大器这个名称是从增益特别高、工作特性取决于反馈元件的差模输入型直流放大器引伸出来的。用改变反馈元件类型及其排列的办法，就可进行各种模拟运算。整个电路的特性在很大程度上只取决于这些反馈元件。这样，就可以采用同一种放大器来进行各种运算。随着运放的进一步发展，在电路的设计概念方面现在已经开创了一个全新的时代。

早期运放使用的是当时的基本器件——真空管。直到 20 世纪 60 年代，运放电路使用固态技术设计之后，运放才得到十分广泛的应用。因为这时已出现了固态运放模块，在这种模块中，采用了内引线连接技术，将分立的固态元器件组织成运放电路。

* 运算放大器简称“运放”。——译者注

到了60年代中期，研制成功了第一块集成运放。几年之内，集成运放的使用已经远远超出模拟计算机领域，成为各种应用领域里的标准的设计工具。

由于集成电路制造技术具有大批量生产能力，集成运放又在广泛领域里得到应用，故反过来又使价格进一步降低。今天，一个增益为100dB、输入失调电压为1.0mV、输入电流为100nA，带宽为1.0MHz的通用集成运放的售价已低到1美元以下。早期用许多分立元件组成的运放系统，现在已发展到可把放大器当作一个分立元件来对待——这个事实改变了线性电路的整个设计面貌。

由于上述原因，我们在无源元件的价格方面，受益甚大。所以，对大多数直流和低频应用，如仍采用分立的有源元件进行设计，那就是对时间和金钱的极大浪费。很清楚，电子线路的设计重点，更多的是放在系统设计上，故集成运放重新确立了设计电子线路的“基本规则”。为了应付未来的挑战，目前，我们必须善于掌握和灵活运用这些属于“系统”规模的元件。

目 录

第一部分 集成运算放大器引论

第一章 运算放大器的基础	(3)
1.1 理想运算放大器.....	(3)
1.2 非理想运算放大器.....	(17)
1.3 集成运算放大器的技术规范.....	(58)
第二章 集成运算放大器：通用型和专用型运算放大器的演变	(73)
2.1 通用型运算放大器的历史和发展.....	(73)
2.2 专用型集成运算放大器及其特性.....	(118)
第三章 集成运算放大器使用时的一般操作和保护	(131)
3.1 失调调整方法.....	(131)
3.2 误用和失效模式的防止.....	(142)
3.3 最佳稳定的接地规则.....	(152)

第二部分 集成运算放大器的应用

第四章 电压调整器和参考电路	(163)
4.1 电压调整器.....	(163)
4.2 电流调整器.....	(199)
第五章 信号处理电路	(218)
5.1 精密二极管.....	(218)
5.2 精密限幅器.....	(220)
5.3 直流恢复器.....	(224)
5.4 半波整流器.....	(225)
5.5 绝对值电路（全波精密整流型电路）.....	(227)

5.6	峰值检波器	(243)
5.7	采样-保持电路	(248)
5.8	限幅器	(251)
5.9	二极管电桥电路	(258)
5.10	可变偏置电压跟随器(精密电平移位器)	(261)
5.11	单电源电压跟随器	(262)
5.12	符号变换器	(264)
第六章	对数和乘法器电路	(269)
6.1	对数变换器	(269)
6.2	模拟乘法器	(280)
第七章	放大器技术	(309)
7.1	仪用放大器	(309)
7.2	复合放大器	(326)
7.3	高性能运算放大器	(334)
7.4	输入缓冲	(346)
7.5	输出缓冲	(349)
第八章	比较器	(358)
8.1	基本差模输入比较器	(358)
8.2	基本单端输入比较器	(361)
8.3	滞后比较器	(362)
8.4	具有滞后作用的单端比较器	(365)
8.5	具有箝位反馈的比较器	(366)
8.6	使用301A型放大器的箝位比较器	(367)
8.7	精密的可变箝位	(369)
8.8	检零器	(370)
8.9	窗孔比较器	(371)
8.10	标准的集成比较器器件	(375)
8.11	精密运放比较器	(378)

8.12	通用接口电路	(380)
第九章	积分器和微分器	(383)
9.1	积分器	(383)
9.2	微分器	(393)
第十章	信号发生电路	(400)
10.1	正弦波振荡器	(400)
10.2	多谐振荡器	(412)
10.3	函数发生器	(420)
10.4	锯齿波发生器	(431)
10.5	压控信号的发生和调制	(440)

第三部分 附 录

各生产厂家通用运算放大器数据一览表	(453)
国内外运算放大器对照表	(576)

第一部分

集成运算放大器引论

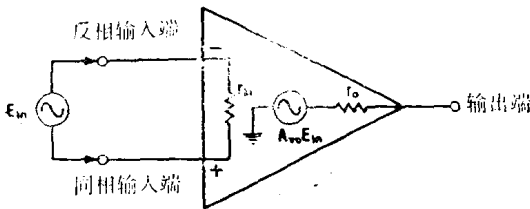


第一章 运算放大器的基础

1.1 理想运算放大器

理想运放的基本原理比较简单。也许，理解理想运放的最佳办法，就是将通常的放大器元件（晶体管、电子管或别的器件）的概念统统忘掉，而代之以把运算放大器理解为一个具有输入端和输出端的方框。这样，就可以用理想的概念研究运算放大器，而不必考虑方框中是什么东西。

这种理想化的运算放大器见图 1-1。放大器是具有两个差分输入端和一个单端输出的直接耦合型器件。放大器只响应两个输入端之间的差模电压，而不响应其间的共模电压。反相(-)输入端上的正向信号在输出端上产生一个负向信号；而同相(+)输入端上的正向信号仍然产生相同极性的正向输出信号。差模输入电压为 E_{i_n} 时，输出电压 E_o 就等于 $A_{vo}E_{i_n}$ 。这里， A_{vo} 是放大器的增益。不管怎样应用放大器，它的两个输入端总是要用到的，而输出信号是由对地的输出端引出的。因此，放大器需使用双(±)电源工作。



$$\begin{aligned} E_o &= A_{vo} E_{i_n} \\ A_{vo} &= \infty \\ r_{i_n} &= \infty \\ r_o &= 0 \\ BW &= \infty \\ \text{如 } E_{i_n} = 0, E_o &= 0 \end{aligned}$$

图1-1 理想运放的等效电路

考虑到上述输入和输出功能，现在可把这种放大器的理想特性定义如下：

1. 电压增益为无限大—— $A_{vo} = \infty$ ；
2. 输入电阻为无限大—— $r_{i_n} = \infty$ ；
3. 输出电阻为零—— $r_o = 0$ ；
4. 带宽为无限大—— $BW = \infty$ ；
5. 输入失调电压为零—— $E_o = 0$ （当 $E_{i_n} = 0$ 时）。

从这些理想特性出发，可导出运放两个十分重要的附加性能。由于电压增益为无限大，一个无限小的输入信号就可放大为一个输出信号。所以：大体上可以认为：

1. 差模输入电压为零；

而且，如果输入电阻为无限大时，就可得出：

2. 流入两个输入端的电流为零。

可将这两个特性视作运放的两个准则，在运放的分析 and 设计中要反复用到这两个准则。只要理解了这些特性，理所当然地就能对任何一种运放的工作进行论述。对以下各种运放组态的讨论，将有助于阐述这个问题。

1.1.1 基本的运算放大器组态

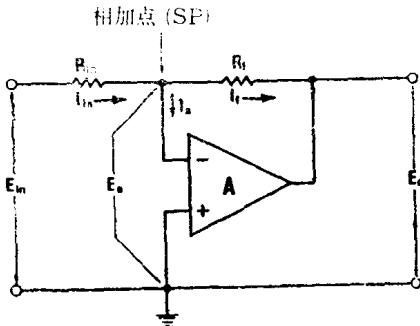
运放有两种基本组态：（1）反相放大器组态及（2）同相放大器组态。事实上，所有其他运放电路都是由这两种基本组态按某种方式构成的。此外，还有与上述两种基本组态密切相关的一类电路，即由前两种组态组合而成的另一种基本组态——差模放大器。

反相放大器

图1-2所示系第一种基本运放组态——反相放大器。在反相放大器中，正相输入端（+）接地，信号通过 R_{i_n} 加于反相输入端

(-) 上, 同时经由 R_f 将输出端的信号反馈到 R_{in} 。应用前述理想运放的性质, 可将这种线路的特性分析如下:

由于放大器的增益为无限大, 故在输入电压为零时, 放大器就有一定的输出电压 E_o 。由于 A 的差模输入为 E_s , 而 $E_s = 0$ 。这时, 整个输入电压 (E_{in}), 必然全部加在 R_{in} 上, 使通过 R_{in} 的电流为:



$$I_{in} = \frac{E_{in}}{R_{in}}$$

$$I_s = 0, E_s = 0$$

∴ 求和点为零电位或虚地点

$$\text{那么, } I_{in} = \frac{E_{in}}{R_{in}}$$

因为 $I_s = 0, I_f = I_{in}$

并且 $I_f = \frac{-E_o}{R_f}$ (因为是反相),

$$\text{于是 } \frac{E_{in}}{R_{in}} = \frac{-E_o}{R_f}$$

$$\text{增益} = \frac{E_o}{E_{in}} = \frac{-R_f}{R_{in}}$$

反相放大器特性可归纳如下:

- (1) 增益 = $\frac{-R_f}{R_{in}}$, 范围不限 (R_f 可以为零, 这时增益等于零)。
- (2) 输入阻抗 = R_{in} 。
- (3) $I_f = I_{in}$, 与 R_f 无关。
- (4) 相加点为虚地点, 其电位与 (+) 输入端相同。

图 1-2 运放的反相放大器组态

另外, 由于输入阻抗无限大, 故 $I_s = 0$, 因而, 输入电流 (I_{in}) 必然流入 R_f ; 于是

$$I_f = I_{in}$$

输出电压 (E_o) 全部加在 R_f 上, 而且是负向的 (因为在这种放大器中输出电压的符号和输入电压的符号相反)。如果用 E_o