

你拿起这本书的时候，
可能是种类繁多、秉性迥异，
但青春健朗、招人怜爱的放大器，
第一次，
如此端庄地站在你的面前，笑容可掬。
好吧……很高兴认识你。

你好，放大器

初识篇

杨建国 著



科学出版社

你好，放大器

——（初 识 篇）——

杨建国 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书是《你好，放大器》的初识篇，是学习放大器的入门书。

第1章介绍放大器的历史和分类定义。第2章用大量篇幅介绍放大器关键指标，以及阅读数据手册的方法。第3章介绍各种各样的运算放大器，包括精密运放、高速运放、电流反馈型运放和全差分运放。第4章是使用放大器的共性问题，这些问题都是作者在指导学生的过程中频繁遇到的。第5章介绍一些典型的放大电路。最后，第6章针对初学者介绍仪器、调试、故障排查，以及报告撰写。

本书适合学过模拟电子技术但还不能完全驾驭放大器的读者，特别是参加全国大学生电子设计竞赛的学生阅读，也适用于企业的员工培训和再提高。

图书在版编目(CIP)数据

你好，放大器（初识篇）/杨建国著.—北京：科学出版社，2015.9

ISBN 978-7-03-045432-4

I.你… II.杨… III.放大器 IV.TN72

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第189135号

责任编辑：喻永光 杨 凯 / 责任制作：魏 谨

责任印制：赵 博 / 封面设计：付永杰

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2015年9月第一次印刷 印张：16 1/4

印数：1—4 000 字数：360 000

定价：68.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

让人魂牵梦绕的东西，都具备三个特点：有难度、能实现、你喜欢。下棋、踢足球、打游戏……追你心仪的对象，但凡你能说得出来的，基本都如此。

趁着年轻，为自己找个兴趣所在吧，最好，它还能养家糊口。

放大器，就具备前两个特点。这本书，只想让你喜欢它。

……

而现在，你拿起这本书的时候，可能是种类繁多、秉性迥异，但青春健朗、招人怜爱的放大器，第一次，如此端庄地站在你的面前，笑容可掬。

好吧……很高兴认识你。

你好，放大器。

本文出现的截图，除特殊标注外，均来自于图中显现的 ADI 公司相关芯片的数据手册，不再一一标注。也正因为如此，本书没有刻意按标准统一电路符号，特别是电阻元件。这样更符合现实。

本书出现的统计表格，数据基本来自于 ADI 公司可下载的表格——对其中某些无数据的地方，我进行了填充。但不保证完整。所有与设计相关的数据，请参考 ADI 公司官网。

除 4.8 节参考了 ADI 公司的“Linear circuit design handbook”（edited by Hank Zumbahlen; with the engineering staff of Analog Devices），其余内容包括指标定义，均为我根据自己的理解撰写的，不涉及参考文献。

感谢 ADI 公司大学计划部为本书提供的资助，感谢他们答应了我的要求——客观公正地讲述，不带有广告色彩。

目 录

第 1 章 放大器定义、分类和选择使用

1.1 放大器定义	1
1.2 放大器的全家谱	1
1.2.1 晶体管	1
1.2.2 运算放大器	3
1.2.3 功率放大器	6
1.3 选择放大器的原则	12

第 2 章 运算放大器的关键性能指标详解

2.1 输入失调电压 (Offset Voltage, V_{OS})	13
2.2 失调电压漂移 (Offset Voltage Drift)	14
2.3 输入偏置电流 (Input Bias Current, I_B)	15
2.4 输入失调电流 (Input Offset Current, I_{OS})	16
2.5 关于失调和偏置的总结	17
2.5.1 零输入时怎么计算放大器的实际输出?	17
2.5.2 易受影响的电路	20
2.5.3 如何克服直流意外的影响	21
2.6 噪声指标 (Noise)	23
2.6.1 初识噪声	24
2.6.2 最简单的运放的噪声模型	28
2.6.3 U_{N1} 的噪声密度及噪声有效值计算	29
2.6.4 从噪声电压密度曲线中获得 C 和 K	31
2.6.5 噪声计算中频率的起点 f_o 和终点 f_b	34
2.6.6 噪声的有效值和峰峰值的关系	38
2.6.7 OP27 噪声计算实例	39

2.6.8	完整运放电路的噪声计算	41
2.6.9	多级放大电路的噪声计算	46
2.6.10	噪声计算总结	47
2.6.11	噪声计算中的一些有趣问题	50
2.7	输入电压范围 (Input Voltage Range)	53
2.8	输出电压范围 (V_{OH}/V_{OL} 或者 Swing from Rail)	55
2.9	共模抑制比 (Common-Mode Rejection Ratio, CMRR)	56
2.10	开环电压增益 (Open-Loop Gain, AVO)	59
2.11	压摆率 (Slew Rate, SR)	60
2.12	带宽指标	61
2.13	建立时间 (Settling Time)	63
2.14	相位裕度 (Phase Margin, ϕ_m) 和增益裕度	64
2.15	电源电压抑制比 (PSRR, Power Supply Rejection Ratio)	65
2.16	全谐波失真加噪声 (THD+Noise)	66
2.17	热阻 (Thermal Resistance, θ_{JA}) 和温度范围	67
2.18	读懂运放数据手册	68
2.18.1	数据手册之重要性	68
2.18.2	快速检阅的技巧	69
2.18.3	与 dB 相关的参数	69
2.18.4	读懂首页	73
2.18.5	性能规格 (Specifications)	77
2.18.6	绝对最大额定值 (Absolute Maximum Ratings)	80
2.18.7	热阻 (Thermal Resistance)	81
2.18.8	供电次序 (Power Sequencing)	81
2.18.9	运行特性 (Typical Performance Characteristics)	81
2.18.10	应用 (Applications)	89
2.18.11	外形尺寸 (Outline Demensions)	90
2.18.12	订购指导 (Ordering Guide)	90

第 3 章 多种多样的运算放大器

3.1 精密运放和高速运放	92
3.1.1 精密运放概述	92
3.1.2 高速运放	98
3.1.3 查找满足条件的放大器	98
3.2 电流反馈型运算放大器 (CFA)	99
3.2.1 电流反馈型放大器的内核	99
3.2.2 基本分析方法	100
3.2.3 CFA 和 VFA 传函对比	100
3.2.4 优缺点总结	104
3.2.5 ADI 的电流反馈型放大器	105
3.3 全差分运算放大器	106
3.3.1 概 述	106
3.3.2 常见电路分析方法	107
3.3.3 ADI 的全差分放大器	117

第 4 章 使用放大器的共性问题

4.1 放大器的封装	119
4.1.1 关于封装的一些基本概念	119
4.1.2 封装信息表	120
4.1.3 常用管脚分布和例外	121
4.2 供电和电源去耦	122
4.2.1 给放大器供电的几项注意	122
4.2.2 怎么给放大器电源配置电容?	122
4.2.3 配置旁路电容的注意事项	124
4.3 不要忽视直流通路	125
4.3.1 为什么要给放大器提供直流通路?	125
4.3.2 仪表放大器不接受浮空输入	126
4.3.3 差动放大器可以接受浮空输入	127
4.3.4 全差分放大器可以接受浮空输入	127
4.4 自激振荡	128
4.4.1 自激振荡现象	128

4.4.2	根本原因	128
4.4.3	避免和消除	129
4.5	驱动大电容负载	129
4.5.1	能驱动大电容的运放	130
4.5.2	驱动大电容的典型电路	131
4.6	注意输入端保护	132
4.6.1	一个小故事	132
4.6.2	原 因	132
4.6.3	得出的结论	134
4.7	带宽计算——最基本的计算	135
4.7.1	传统估算公式——浪费资源	136
4.7.2	关于增益带宽积完整的要求	137
4.7.3	闭环增益表达式	138
4.7.4	k 问题的进一步变形和求解	139
4.7.5	带宽计算实例	141
4.7.6	奇怪的增益隆起	142
4.8	漂亮的布线是成败的关键	145
4.8.1	基础知识	145
4.8.2	布局原则——近、顺	147
4.8.3	走线原则——短、粗、远、滑	147
4.8.4	反馈支路——背面挖空	149
4.8.5	尽量不要自动覆铜	149
4.8.6	多看，多悟，少记	149

第 5 章 典型放大电路分析

5.1	单电源线性变换电路	150
5.1.1	交流耦合	150
5.1.2	直接耦合	155
5.2	电流源电路	162
5.2.1	Howland 电流源	162
5.2.2	利用差动放大器实现的电流源	164
5.2.3	改进电路	165
5.2.4	用晶体管增加输出电流	166
5.2.5	以 R_{SENSE} 为核心的电流源	167

5.2.6	以 R_{SENSE} 为核心的电流源二	168
5.2.7	用仪表放大器实现的电流源	170
5.2.8	低压高效电流源	171
5.3	电流检测	176
5.3.1	检测电流的基本方法	176
5.3.2	低侧还是高侧?	176
5.3.3	分流电阻	177
5.3.4	运放检测电流	178
5.3.5	差动放大器检测电流	181
5.3.6	电流检测放大器	189
5.4	单端转差分电路	195
5.4.1	基本电路	196
5.4.2	交叉反馈电路	197
5.4.3	全差分运放和变压器驱动	198
5.5	复合放大电路	199
5.5.1	串联型复合放大电路	199
5.5.2	并联型复合放大电路	203

第 6 章 仪器使用、焊接、调试和撰写报告

6.1	仪器使用基础	206
6.1.1	正确连接仪器和电路板	206
6.1.2	电源基础	208
6.1.3	信号源设置与示波器观察为什么不一致?	212
6.2	学会使用示波器	213
6.2.1	示波器的重要性	213
6.2.2	示波器能干的, 以及不能干的	213
6.2.3	注意数字示波器的混叠现象	214
6.2.4	利用示波器观察地线	215
6.2.5	关于探头	216
6.2.6	灵活使用示波器的触发	218
6.2.7	数字示波器的其他有用功能	224
6.2.8	使用双通道同时测量	225
6.2.9	数字示波器的自动功能	225
6.3	焊接基础	226

6.4 故障排查的基本技巧	227
6.4.1 故障排查的基础	227
6.4.2 排查故障中合理使用仪器	228
6.4.3 故障出现后的关键几分钟	228
6.4.4 保护故障现场	229
6.4.5 故障定位——故障排查的核心	230
6.4.6 故障定位的常见方法	230
6.4.7 故障排查次序	234
6.4.8 故障排查实例一：两片 ARM 烧毁的教训	235
6.4.9 故障排查实例二：诡异的短路故障	238
6.5 撰写漂亮的报告	239
6.5.1 态度端正	239
6.5.2 报告组成	241
6.5.3 构建标题框架	244
6.5.4 图题、表题	244
6.5.5 公 式	245
6.5.6 制表技巧	245
6.5.7 绘图技巧	246
6.5.8 常见错误	246
后 记	249

第 1 章

放大器定义、分类和选择使用

1.1 放大器定义

电学中能够实现信号、功率放大的器件，称为放大器，英文为 Amplifier。

以放大器为核心，能够实现放大功能的电路组合，称为放大电路。

在很多情况下，放大器和放大电路被混淆。严格来说，放大器是一个器件，Device，比如一个 3 管脚的晶体管或者一个 8 管脚的运算放大器，都是放大器。而放大电路是这些器件加上电阻电容、线路板或者导线焊接到一块儿的，是一个组合。

虽然我能够分清这些，但有时我也乱用。其实，大可不必为此纠结，你愿意怎么叫就怎么叫吧。多数人分不清楚的东西，你分那么清楚干什么啊？

1.2 放大器的全家谱

全部放大器被分为 3 种：晶体管放大器、运算放大器和功能放大器。

除此之外，世上还存在电子管放大器，只在特殊领域，比如高级音响中使用。这个我不懂，从我读书时，就没有见过这古老的家伙了。但我知道，有人懂，还在用。

1.2.1 晶体管

晶体管分为两类：双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT，分为 NPN 型、PNP 型）、单极型晶体管（也称场效应管，Field Effect Transistor, FET）。其中场效应管还分为 JFET 和 MOSFET，就是结型管和金属氧化物管，它们都有 N 沟道和 P 沟道之分。从符号看，晶体管可以画成 8 种：双极型 2 种，单极型 6 种，如图 1.1 所示。

所谓双极型晶体管，是指这种晶体管内部，既有电子运动形成电流，也有空穴运动形成电流。一个多，称为多子；一个少，称为少子。两者的运动方向相反，飞向两个不同的“极”。而所谓的单极型晶体管中，只有空穴或者只有电子运动形成电流，只有多子存在，飞向单一的“极”。

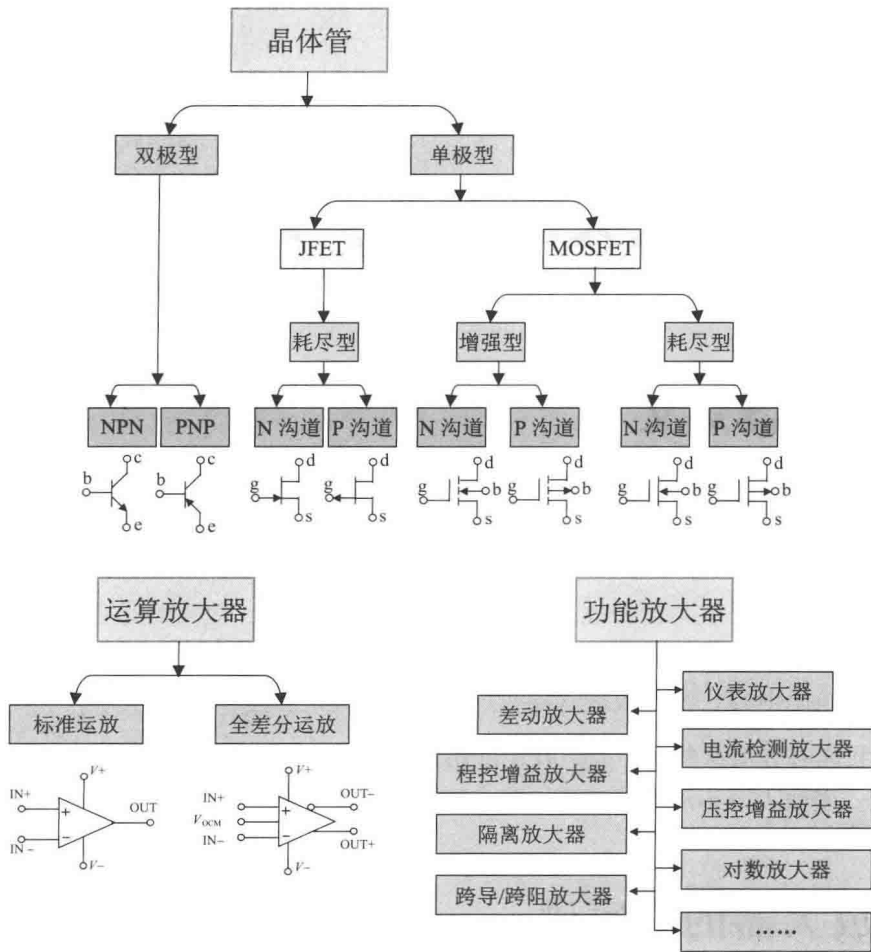


图 1.1 放大器全家谱

晶体管可以组成常见的共射（源）极、共基（栅）极、共集电（漏）极放大电路，以及类型多变的多级放大电路。

学过晶体管放大电路的同学们，或多或少都会感到晶体管及其放大电路的复杂。从静态工作点开始，到微变等效电路，再到增益计算、输入电阻、输出电阻计算，还有频率特性，要想完成一个各项指标满足要求的放大电路，可不是一件容易的事情。虽然这个放大电路使用的器件很便宜，电阻电容数量也不是很多，但是复杂的计算限制了这种放大电路的推广。

20 世纪 60 年代是一个电子技术爆发的年代，集成电路的问世引发了一系列雪崩式的发展。科学家们在“如何让更多用户简单使用放大器”这个问题上，给出的答案是：设计一种傻瓜型放大器，结合负反馈理论，很简单就可以组成一个放大电路，其增益设计也极为简单。这就是运算放大器——Operational Amplifier。

1.2.2 运算放大器

运算放大器又称运放，其实就是一个差分输入、多级、直接耦合、高增益放大电路（通常放大倍数大于 10000），用集成电路工艺生产在一个单芯片集成电路中。它有两个差分输入端，一个或者两个输出端，两个供电电源端。

运放的渊源，以及必要的数学分析

设计并生产一种指定增益的放大器，并把它封装在一个集成电路中，形成傻瓜型应用，对集成电路生产商来说，是极为简单的。但是，困难的是，厂商得准备多少种增益选择呢？从 1 倍开始，1.1，1.2……要不要准备 1.05 倍呢？

数学家早已解决了这个问题。按照负反馈理论，集成电路生产商只需要生产满足如下要求的集成放大器（称之为运算放大器），即可实现用户的一切要求：

- (1) 运放的开环增益非常大，即图 1.2 中 A_{uo} 很大。
- (2) 运放的输入端没有电流，即运放具有极高的输入阻抗。

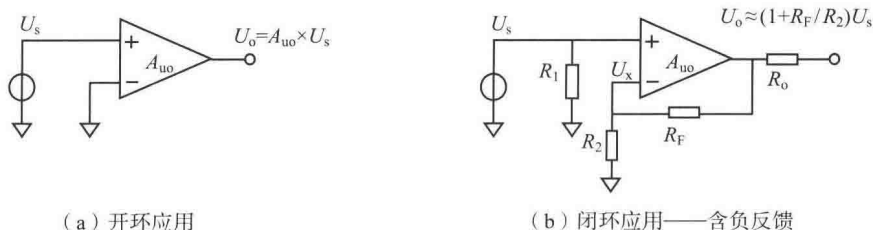


图 1.2 运放结合负反馈的魅力：从开环到闭环应用

图 1.2 (a) 是一个满足要求的运放，但这个电路几乎不能正常使用。因为开环增益实在太大了，输入信号得多么小，才能让输出稳定呢？图 1.2 (b) 把输出端通过两个电阻分压，引回到负输入端，形成负反馈，这个电路就能够正常工作了。根据数学家要求的条件，有下式成立：

$$\begin{cases} U_o = A_{uo} \times (U_s - U_x) \\ U_x = U_o \times \frac{R_2}{R_2 + R_F} \end{cases} \quad (1.1)$$

两个独立的方程，3 个未知量，可以解得任意两个未知量之间的关系，得到：

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_s} = \frac{A_{uo}}{1 + A_{uo} \frac{R_2}{R_2 + R_F}} \quad [1.2(a)]$$

$$U_x = U_s \frac{A_{uo} R_2}{R_2 + R_F + A_{uo} R_2} \quad [1.2(b)]$$

其中, A_{uf} 称为闭环增益, 就是运放组成负反馈电路后的电压增益。当 A_{uo} 很大时, 得到:

$$A_{uf} \approx \frac{R_2 + R_F}{R_2} \quad [1.3(a)]$$

$$U_x \approx U_s \quad [1.3(b)]$$

式 [1.3(a)] 说明, 当满足数学家提出的条件后, 该负反馈电路的增益仅与外部电阻 R_2 、 R_F 有关, 而与实际运放的开环增益 A_{uo} 没有什么关系。这太好了, 运放生产商可以甩开膀子大干了, 管它 A_{uo} 具体多大呢, 只要足够大就可以了。用户想要多大的增益, 自己选择合适的电阻就可以了。

式 [1.3(b)] 说明, 运放在这种情况下, 同相输入端加载的是信号 U_s , 那么反相输入端呈现出的电位就一定非常接近 U_s , 即 $U_{IN-} \approx U_{IN+}$, 这就是我们常说的“虚短”: 从电位上看, 运放的两个输入端等电位, 似乎短接一般。请千万注意, “虚短”不是运放本身的特性, 而是深度负反馈导致的必然结果。

为了更直观, 我们假设 $R_2=1k\Omega$, $R_F=3k\Omega$, 然后看看 A_{uo} 从 10 变到 1000000, 闭环增益和虚短情况。

表 1.1 开环增益对负反馈放大电路的影响

A_{uo}	式 [1.3(a)] 估算 A_{uf}	式 [1.2(a)] 计算 A_{uf}	式 [1.3(b)] 估算 U_x	式 [1.2(b)] 计算 U_x
10	4	2.857142857	U_s	$0.714285714 \times U_s$
100	4	3.846153846	U_s	$0.961538462 \times U_s$
1000	4	3.984063745	U_s	$0.996015936 \times U_s$
10000	4	3.99840064	U_s	$0.99960016 \times U_s$
100000	4	3.999840006	U_s	$0.999960002 \times U_s$

可以清晰看出, 随着 A_{uo} 越来越大, 使用式 (1.3) 得到的估算结果, 与使用式 (1.2) 得到的精算结果, 越来越接近。图 1.2(b) 所示电路中, 用户需要的指标都可以简单实现。

- (1) 闭环电压增益约为 $1+R_F/R_2$, 用户自己选择电阻实现。
- (2) 输入阻抗等于 R_1 , 用户自己选择。
- (3) 输出阻抗等于 R_o , 用户自己选择。

图 1.2(b) 所示电路, 只是一个非常简单的含运放负反馈电路, 它实现了简单的比例运算。20 世纪 60 年代中期第一颗运放 $\mu A709$ 诞生后, 科学家和工程师们围绕着这种神奇的 2 入 1 出器件, 设计出了很多负反馈拓扑以及运算电路——一颗种子, 种出了太多的花: 常见的运算电路包括比例、加法、减法、积分、微分、对数、指数等, 以及基于频率分析的各种各样的滤波器。如果配合使用模拟乘法器, 还可以实现乘法、 n 次方、开方等运算。甚至, 用这些电路还可以解方程。这其实已经初步具备了模拟计算机诞生的条件, 但是历史的走向, 却让数字处理器占了上风, 这是后话。

在那个辉煌的年代，诞生了很多关于运算放大器的故事。让我们记住几个名字，第一家推出运放的公司：Fairchild——美国仙童公司，设计第一款运放 $\mu\text{A}709$ 的，桀骜不驯的 Robert J. (Bob) Widlar。此后几十年至今，各个公司兴衰轮回，设计者各领风骚，营造了一个庞大的半导体模拟世界。

向他们致敬。

关于第一款运放到底是不是 $\mu\text{A}709$ ，其实有各种说法。我又查了维基百科。资料显示，1963 年，Widlar 设计了 $\mu\text{A}702$ ，但不算成功。直到 1965 年，他为仙童公司设计的 $\mu\text{A}709$ 才被较为广泛地使用。而真正产生巨大影响的，至今还在生产的长寿运放，当属 1968 年诞生的 $\mu\text{A}741$ 。

全差分运放的诞生

后来，在这种标准运放的基础上，科学家又研制了另一种运放，称为全差分运放，它有差分输入脚 $\text{IN}+$ 和 $\text{IN}-$ ，差分输出脚 $\text{OUT}+$ 和 $\text{OUT}-$ 。除此之外，还有一个输入脚，称之为 V_{OCM} 。如图 1.3 所示，它们之间的关系如下。

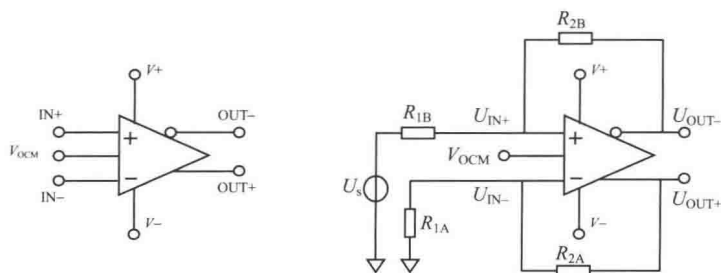


图 1.3 全差分运放以及全差分运放组成的单端差分放大电路

$$U_{\text{OUT}+} - U_{\text{OUT}-} = A_{\text{uo}}(U_{\text{IN}+} - U_{\text{IN}-}) \quad (1.4)$$

$$\frac{U_{\text{OUT}+} + U_{\text{OUT}-}}{2} = V_{\text{OCM}} \quad (1.5)$$

式 (1.4) 很容易理解，与标准运放的差别仅在于全差分运放的输出也是差分的。即，差分输出值等于差分输入值乘以一个很大的开环增益 A_{uo} 。

式 (1.5) 是一个新概念，当你在 V_{OCM} 端接入一个电压，那么差分输出的两个端子的共模电压（即两个差分输出信号的平均值）将等于你输入的 V_{OCM} 。这可以理解为，两个差分输出端子，将围绕着输入的 V_{OCM} 电位，产生方向相反的波动。这个功能常用于输出电平的移位。

利用与标准放大器式 (1.1) ~ 式 (1.3) 完全相同的分析方法，可以准确求解出输出。但为了避免大家早早地厌烦，我们先休息一下，第 3 章会帮大家分析。

为了区别这两种运放，2 入 1 出的可以称为标准运放，2 入 2 出的可以称为全差分运放。

当然，大多数人还是把标准运放直接称为运放。

至此，有了标准运放和全差分运放，结合负反馈理论，已经完全可以应对几乎所有的放大问题。几十年来，科学家和工程师们以标准运放和全差分运放为核心，设计并实践了成千上万种电路，任何一本书都难以把它们囊括在内。

尽管如此，生产商还是不会停止他们研究的步伐：为了他们的利益，当然也是为了用户的方便，又开发出了很多种功能放大器。

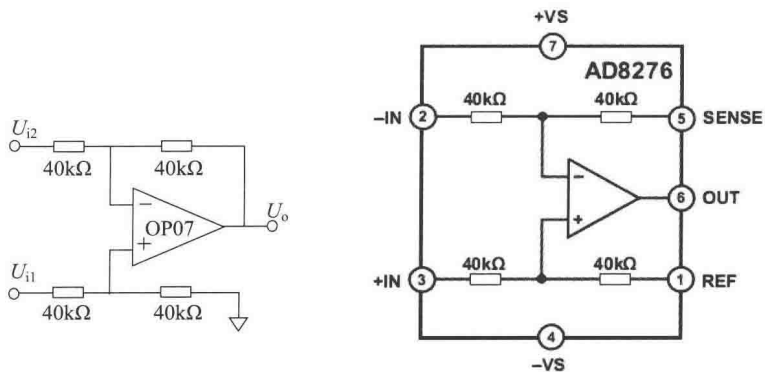
1.2.3 功能放大器

如果某个以运放为核心的放大电路，非常常用，生产厂家就会考虑把这个放大电路（包括运放和外围电阻）进一步集成，提供给用户。这就是功能放大器。

比如我们要设计一个放大电路，实现 $U_o = U_{i1} - U_{i2}$ 。使用运放可以给出图 1.4 (a) 所示的电路。但是，在实现过程中，用户可能遇到 4 个电阻不好匹配的问题，而这个电路又是很常见的，于是集成电路生产商（比如 ADI 公司）就把这个电路集成在一个叫做 AD8276 的集成电路中，这就是一种功能放大器，被称为差动放大器——Difference Amplifier。

当然，这种放大器内部的电阻有像 AD8276 一样的，是 1:1 的，也有 1:10、1:5、1:2 的，型号也就不同。这取决于哪种电阻匹配是较为常见的。

这就是所有功能放大器诞生的基础：功能很常见，用户自己做没有厂家做得好。



(a) 减法器电路

(b) 可以方便实现减法器功能的AD8276

图 1.4 根据减法器需求演变出的功能放大器——差动放大器

功能放大器种类很多，常见的有以下几种。