

运算放大器及其应用

彭军 编著

过电流变换电路

 科学出版社
www.sciencepress.com

电位器

(b) 转速计传感器和电位器安装在直流电动机上的情况

运算放大器及其应用

彭 军 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

运算放大器是模拟技术的捷径。电子学电路的标准已经由以往的晶体管、二极管等分立器件组成的电路变为使用运算放大器的电路。本书主要介绍运算放大器的原理以及各种实际应用电路,包括运算放大器电路在传感技术、振荡器领域应用的设计和计算方法,滤波器电路以及信号的转换电路,电流反馈型运算放大器的特性,运算放大器在低噪声、高精度测量技术中的应用以及强化运算放大器的输出能力的方法。另外,还介绍了在电子机械技术领域具有重要应用价值的直流电动机的控制电路。

本书可供电子技术领域的工程技术人员、相关专业大学生以及广大电子爱好者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

运算放大器及其应用/彭军编著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-022250-3

I. 运… II. 彭… III. 运算放大器-基本知识 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 081934 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:琬 佳

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 7 月 第一次印刷 印张: 15 3/4

印数: 1—4 000 字数: 301 000

定 价: 33.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<路通>)

前 言

国外一位在计算机硬件开发中迅速发展起来的 D 社社长曾经说过：“欢迎掌握电子电路的年轻的专业技术人员。与数字电路相比，更欢迎懂得模拟电路的人。懂得数字电路的人出乎意料地多，但是，具有带领开发团队能力的人是掌握模拟电路技术的工程师”。

的确是这样。这里所说的模拟技术人员，并不是不懂数字电路只懂得模拟电路的人，而是很懂数字电路，或者如果需要，通过努力就能够迅速达到相当水平的人。

说懂得或掌握模拟电路，有各种含意，通常是指包含晶体管等分立器件在内，能够进行综合的电路设计的人。像刚从大学或者大专毕业的学生，要求马上达到这样的水平当然是不容易的。尚需要毕业后，在实践中经过多年努力，不断提高自己的资质。

在谈论模拟电路技术时，我们知道，像输入阻抗或者输出阻抗，或者其他各种参量之间是相互关联的，因而给解析和设定带来困难。最终的办法是模拟 IC 的设计，用计算机对记述电子统计行为的多元微分方程进行解析计算，确定制作方法。

由于半导体 IC 化技术的发展，人们现在已经能够很容易得到廉价的、小型化的运算放大器。特别是通用运算放大器的价格已经降低到相当于 1 个晶体管或者二极管的程度。使用运算放大器的电子电路容易设计，而且整个电路使用的部件少，功率消耗也小，以至于电子学电路的标准已经由以往的晶体管、二极管等分立器件组成的电路变为使用运算放大器的电路。

运算放大器是模拟技术的捷径。使用它，不仅使模拟电路设计变得非常容易，而且还能实现众多功能，何乐而不为？作为电子工程师，如果在熟练使用运算放大器的过程中，进一步领悟到运算放大器的奥妙，无疑会使您的模拟电路技术水平上升到一个新的层次。

本书介绍了运算放大器的原理以及各种实际应用电路。作为范例,针对在传感技术、振荡器领域的广泛应用,详细介绍了运算放大器电路的设计以及参数的计算方法。针对降低控制电路中噪声影响的问题,介绍了滤波器电路以及信号的转换电路。还介绍了如何利用电流反馈型运算放大器提高高频增益特性,运算放大器在低噪声、高精度测量技术中的应用,运算放大器怎样与射极跟随器结合,强化运算放大器的输出能力。此外还介绍了在电子机械技术领域具有重要应用价值的直流电动机的控制电路。

作为本书的对象,既考虑到初学者,也考虑到年轻的电子工程师们。如果他们能够从中受益,将不胜欣慰。

由于水平有限,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

最后,谨向在编写过程中所参看的文献的著译者表示感谢,同时对在本书的策划、编写以及出版过程中给予大力支持和指导的科学出版社科龙电工电子编辑部的各位表示诚挚的谢意。

编 者

目 录

第 1 章 运算放大器基础	1
1.1 运算放大器的重要地位	1
1.2 运算放大器的放大作用	2
1.3 运算放大器的放大形态	6
1.3.1 运算放大器的符号	6
1.3.2 放大的 3 种形态	7
1.3.3 运算放大器的反转放大和非反转放大	8
1.3.4 运算放大器的外形与管脚配置	11
1.4 理想的运算放大器与实际 IC 运算放大器	11
1.5 运算放大器的电特性	15
1.6 运算放大器的基本运算电路	22
1.6.1 微分电路	22
1.6.2 积分电路	24
1.6.3 加法电路	24
1.6.4 差动放大与减法电路	26
1.6.5 如何进行乘法、除法、平方根运算	26
1.7 怎样选用运算放大器	30
第 2 章 运算放大器的电源电路	33
2.1 单电源电路	33
2.2 双电源电路	34
2.3 使用 3 端调节器的稳压电源	34



2.4	使用 DC-DC 转换器的单电源电路	36
2.5	使用 USB 的单电源电路	37
2.6	使用 USB 的双电源电路	37
2.7	单电源运算放大器的使用方法	38
第 3 章	比较器与非线性处理	41
3.1	比较器电路	41
3.1.1	比较器的使用方法	41
3.1.2	脉宽调制	43
3.1.3	具有滞后现象的比较器	44
3.1.4	反转比较器与正相(非反转)比较器	47
3.1.5	窗式比较器	47
3.2	比较器用 IC	48
3.3	非线性处理的技巧	50
3.3.1	理想的整流电路	50
3.3.2	反转型理想化半波整流电路	52
3.4	全波整流(绝对值)电路	54
3.5	限幅电路	54
3.5.1	齐纳二极管限幅器	54
3.5.2	二极管限幅器	55
3.5.3	其他限幅电路	57
第 4 章	振荡电路	59
4.1	正反馈振荡的原理	59
4.2	移相式振荡电路	60
4.3	维恩电桥振荡电路	61
4.3.1	维恩电桥电路	61
4.3.2	与放大器组合的振荡原理	61
4.3.3	用二极管替代面结型 FET	63

4.4	双相振荡器	65
4.5	无稳态多谐振荡器	66
4.5.1	使用晶体管的基本形式	66
4.5.2	利用运算放大器	68
4.5.3	参数的确定	68
4.6	方波与三角波的产生	68
4.6.1	工作原理	69
4.6.2	振荡频率	70
4.6.3	设计	70
4.6.4	宽带方波发生电路	73
4.7	锯齿波的产生	73
第 5 章	运算放大器与射极跟随器的结合	76
5.1	射极跟随器电路	76
5.2	运算放大器与射极跟随器的组合	76
5.3	运算放大器与推挽射极跟随器的组合(一)	77
5.4	运算放大器与推挽射极跟随器的组合(二)	78
第 6 章	电流反馈型运算放大器	80
6.1	电流反馈型运算放大器	80
6.1.1	过去的运算放大器——电压反馈型	80
6.1.2	新型的运算放大器——电流反馈型	81
6.1.3	电流反馈型运算放大器与电压反馈型运算放大器的比较	82
6.1.4	电流反馈型放大器的设定增益 G 与频率特性的数学解析	83
6.2	电流反馈型运算放大器的基本构成	84
6.2.1	输入缓冲与跨阻抗	84
6.2.2	输出级的构成——射极跟随器	85
6.3	与电压反馈型运算放大器的比较	86
6.3.1	增益与截止频率的关系	86



6.3.2	频率特性的改善	86
6.3.3	方波的响应	89
6.3.4	噪声特性	90
6.3.5	跨阻抗的测定	91
6.4	电流反馈型运算放大器的应用电路	91
6.4.1	栅-阴放大连接自举化的视频放大器	91
6.4.2	输入级采用晶体管的电流反馈型放大器	92
6.4.3	使用电流反射镜的电流反馈型放大器	94
第 7 章	滤波器的基本电路	96
7.1	滤波器的种类	96
7.1.1	按功能分类	96
7.1.2	按阶次分类	97
7.1.3	正相(非反转)型与反转型	97
7.2	低通滤波器	97
7.2.1	用预示图表现特性	99
7.2.2	使用运算放大器的一阶型滤波器	100
7.2.3	传输函数	101
7.3	二阶型低通滤波器	102
7.4	高通滤波器	105
7.5	带通滤波器	107
7.6	陷波滤波器	111
7.7	全通滤波器	112
第 8 章	变换电路	114
8.1	电流-电压以及电阻-电压变换	114
8.2	电压-电流变换	116
8.3	电压-频率以及频率-电压变换电路	120

第 9 章 测量电子电路中的运算放大器	127
9.1 前置放大器的低噪声化技术	127
9.1.1 前置放大器应该具备的性能	127
9.1.2 关于热噪声(Thermal Noise)	130
9.1.3 OP 放大器电路中产生的噪声	133
9.1.4 前置放大器的频率特性和失真特性	139
9.2 电流输入放大器	142
9.2.1 电流输入放大器概述	142
9.2.2 负反馈电流输入用 OP 放大器的选择	147
9.2.3 CT 中使用的电流输入放大器	148
9.3 差动放大器技术的应用	152
9.3.1 共态噪声的消除	152
9.3.2 差动放大器	155
9.3.3 改良的差动放大器	162
第 10 章 运算放大器在传感器、检测电路中的应用	170
10.1 热敏电阻温度检出电路	170
10.2 热敏电阻温度测量电路	174
10.3 超声波遥控开关	177
10.4 电压检测电路	184
10.5 零交叉检测电路	188
10.6 峰值电压检测电路	190
10.7 停电检测电路	194
10.8 瞬间断电检测电路	197
第 11 章 直流电动机的控制电路	202
11.1 直流电动机的结构	202
11.2 直流电动机的性质	202
11.2.1 转矩、速度、电流的关系	202

11.2.2	反电动势与速度的关系	204
11.2.3	K_E 与 K_T 的等价性	204
11.2.4	电流、电压、速度的关系	205
11.2.5	最大效率条件	206
11.3	直流电动机的驱动电路	206
11.4	直流电动机的电子调速器控制	214
11.5	利用功率运算放大器进行速度控制	216
11.6	电位器位置控制	218
11.7	不使用转速计传感器的位置控制	220
11.8	用脉冲发生器替代速度发生器的速度控制	221
第 12 章	电源、基准电压、恒流电流	223
12.1	基本的稳压源	223
12.2	可变电压源	223
12.3	恒流电路	231
12.4	将单电源改为双电源	232
第 13 章	运算放大器电路问与答	234

第 1 章 运算放大器基础

1.1 运算放大器的重要地位

模拟计算机(analog computer)曾经是重要的计算工具,现在已经很少见到了。不久前,如果说起计算机的话还指的是模拟计算机和数字计算机(digital computer),数字计算机也称为计数型计算机,而现在就只称为计算机了。

所谓模拟计算机就是利用电路以模拟量原封不动地解析微分方程的装置。模拟计算机中的重要部件就是运算放大器。

随着数字计算机的发展,模拟方式的缺陷逐渐凸现出来,它的发展也就逐渐停滞不前了。下列几项是模拟计算机逐步衰颓、数字计算机(现在主要是个人计算机)迅速发展的主要原因:

(1) 虽然模拟计算机的计算速度比数字计算机快,但是数字计算机的速度逐年提高得很快。

(2) 数字计算机中计算值的暂存简单,而模拟计算机在计算中虽然也可以勉强进行记忆,但是记忆所需的时间和成本都是不现实的。

(3) 模拟器件根本性的缺陷是精度差。它对电路的苛刻要求几乎是理想化的,在制作过程中很难实现。例如电阻器的电阻值会随环境温度变化,长时间的使用也会使参数发生变化。即使进行补偿,效果也并非完美。另外运算放大器只是在正负电源电压范围内的计算才是准确的。但是数字计算机的精度只是由位数决定,而且现在提高位数进行计算已经不需增加成本。

尽管要求运算放大器进行精确计算有些勉为其难,但是它的优点还是

很突出的。例如,它能够进行瞬时计算,因而在自动控制等领域仍有重要应用。

尽管以运算放大器为核心部件的模拟计算机的重要性已经不如以往了,然而运算放大器本身依然具有强大的生命力,它的地位甚至还变得更加重要。这是因为运算放大器本质上具备了电子电路所必要的条件,这些条件可以归纳如下:

(1) 自然界的物理现象是模拟式的。各种自然现象(如天体的运行或空气的流动等)是用模拟量表征物理量的。因而我们用数字计算机进行模拟时,必须首先利用各种传感器获取表征自然特性的模拟量。这时运算放大器就具有不可替代的重要作用。

(2) 除计算机以外的其他各种电子电路中,利用运算放大器对各种信号进行处理还是非常方便的。

1.2 运算放大器的放大作用

运算放大器(operational amplifier, Op-amp) IC 的内部可以说就是差分放大器电路,或者说它就是具有反相和同相两个输入端、电压增益非常大的放大器(从直流范围开始就有增益),对两个输入端间的电位差进行放大。

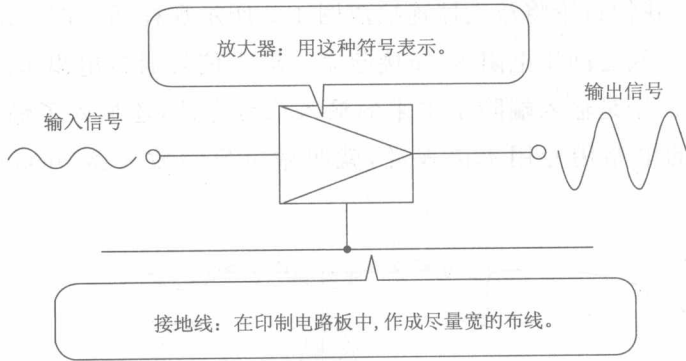
要说运算放大器有什么作用,首先必须肯定它是对电压进行放大的器件。但是,它又是一种具备特殊性质的放大器。

下面用图 1.1(a)对它的电压放大进行说明。我们注意输入与输出信号在时间轴上的关系,并把这种关系画出来,这就是图 1.1(b)。可以看出有反转放大(inverting amplifier)和正相(非反转, non-inverting amplifier)放大两种。

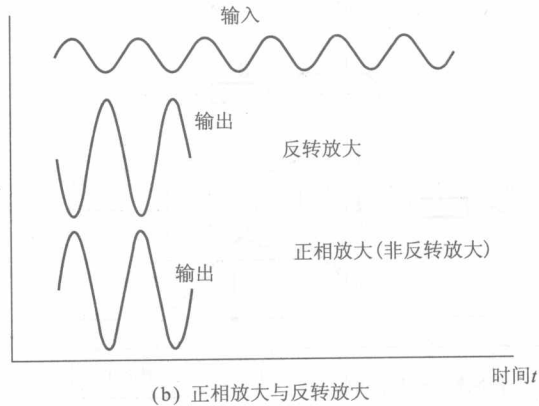
首先要说明的是放大器本身是进行反转放大,而且增益非常高。所谓运算放大器的增益(gain),就是输出信号的振幅与输入信号振幅之比。

运算放大器本身的增益有 10 万倍,甚至达到 100 万倍。把增益这么高的器件使用在图 1.1(a)的电路中是不合适的。这是因为:

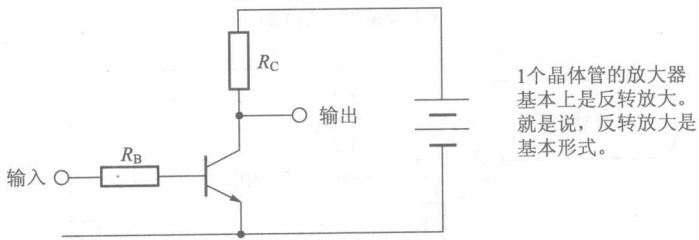
(1) 例如输入振幅为 1mV ,当增益为 10 万倍时,可以计算出输出的振幅会达到 100V 。考虑到通常的电子电路的使用范围在 $-15\text{V}\sim+15\text{V}$,那么实际上只能得到 $+15\text{V}$ 。就是说增益太高了。



(a) 放大输入的电压信号, 成为大振幅的输出信号



(b) 正相放大与反转放大



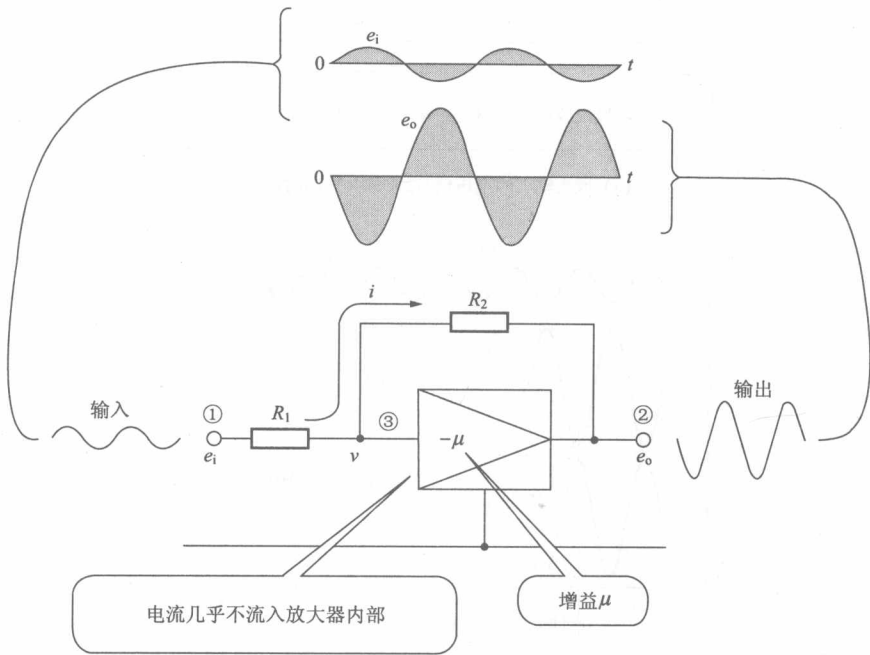
(c) 最简单的反转放大器用1个晶体管构成, 但是实用性差

图 1.1 放大器

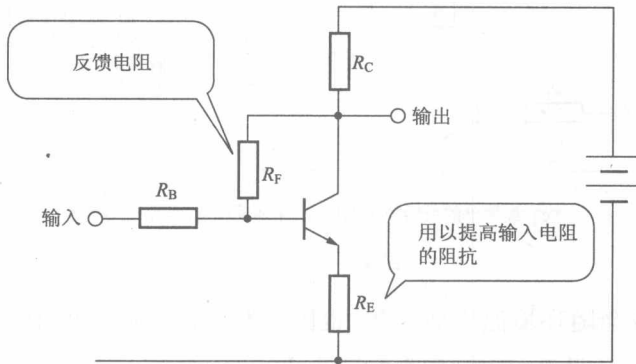
(2) 增益会随环境温度而变化, 也因元器件而不同。由于元器件产品性能具有一定的分散性, 因而很难进行设计。

因此直接应用这么高的增益特性的情况较少。但是它与反馈电路组合起来使用便会产生多种重要特性, 因而组合的方式得到广泛的应用。

现在,我们讨论将放大器连接成图 1.2 所示那样的情况。就是说,在输出端与输入端之间用电阻 R_2 连接起来。输入信号通过电阻 R_1 进入放大器的输入端。于是输入端除了本来的输入信号之外,还加入了输出信号的影响。这样的电路用专用术语来说,就叫做负反馈放大器(negative feedback



(a) 负反馈放大的概念图



(b) 使用 1 个晶体管的放大器,可以这样加负反馈。不过这 4 个电阻的关系复杂,而且性能并不好。

图 1.2 反馈电阻 R_2 、 R_F



amplifier)。

现在分析这个反馈放大器中输入 e_1 与输出 e_2 之间具有什么关系。正如图中所表明的那样,几乎没有电流流入放大器(用专用术语来说,就是输入阻抗非常大,可以认为是无限大)。因此,通过 R_1 的功率(输入电流 i_1)几乎都通过 R_2 。

于是,简单地描述输入端①与输出端②之间的关系的的话,就是图 1.1(b) 所示那样。如果要进行定量计算,首先可以用下式表示放大器的输入端电压 v :

$$v = \frac{R_2 e_1 + R_1 e_o}{R_1 + R_2} \quad (1.1)$$

由此可以看出,输入端电压 v 除包含输入 e_1 之外,还有输出 e_o 的影响。由于经过 $-\mu$ 倍放大而变为 e_2 , 因此有如下关系:

$$-\mu \frac{R_2 e_1 + R_1 e_o}{R_1 + R_2} = e_o \quad (1.2)$$

经过整理后得到

$$e_o = \frac{-\mu R_2 e_1}{R_1 + R_2 + R_1 \mu} \quad (1.3)$$

由于 $\mu \gg 1$, 所以可以近似为

$$e_o = -\frac{R_2}{R_1} e_1 \quad (1.4)$$

由此可以看出,电路的放大倍数并不是放大器的放大倍数 μ , 而是只由外部的电阻 R_1 和 R_2 决定。这是负反馈放大的优点。

顺便指出,这时③的电位是 0。

那么负反馈的“负”是什么意思呢? 上面的式(1.2)之所以可以近似为式(1.4), 是由于认为 $\mu \gg 1$ 的缘故。那么即使 μ 是一个很大的负值, 是否也会得到同样的结果。或者说, 不管是反转放大还是正相放大, 其输入输出的关系是否都是由式(1.3)来确定?

要回答这个问题, 必须考虑电路“稳定还是不稳定”的问题。

图 1.2 中当 μ 为正时(就是说 $-\mu$ 就表示负时), 假如由于某种噪声使输出 e_2 有些许上升(这里认为 e_1 无论如何是不变化的), 于是 v 也就有少许

上升。当这个信号通过放大器时,由于向负的方向变化,会导致 e_2 下降,这就是负反馈的效果,即如果 e_2 发生变化,反馈环 R_2 就向返回的方向起作用。

但是如果相反, μ 是负的($-\mu$ 就变为正),将会怎样呢?

这时如果有某种噪声使 e_2 上升,那么 v 也会升高,朝着正方向放大,使得 e_2 进一步上升。经由 R_2 再进一步放大,于是瞬间 e_2 就上升了许多。就是说电路变得不稳定了。这就是所谓的正反馈(positive feedback)。

巧妙地利用正反馈,可以产生称为滞后的非线性特性,或者制作振荡器,这将在第 4 章介绍。这里介绍负反馈的使用方法。

1.3 运算放大器的放大形态

1.3.1 运算放大器的符号

使用运算放大器时,一般情况下需要有正电源和负电源。也有只使用一个电源的方式,不过是特殊的场合。使用正电源和负电源的方式与使用一个电源的方式,分别叫做双电源方式和单电源方式。

图 1.3 示出运算放大器的符号以及输入输出的关系。运算放大器用一个正三角形符号表示。运算放大器至少有 5 个端子,不过其中的 2 个端子,如从图中看到的那样,是给运算放大器提供电源的。其余的 3 个端子分别是

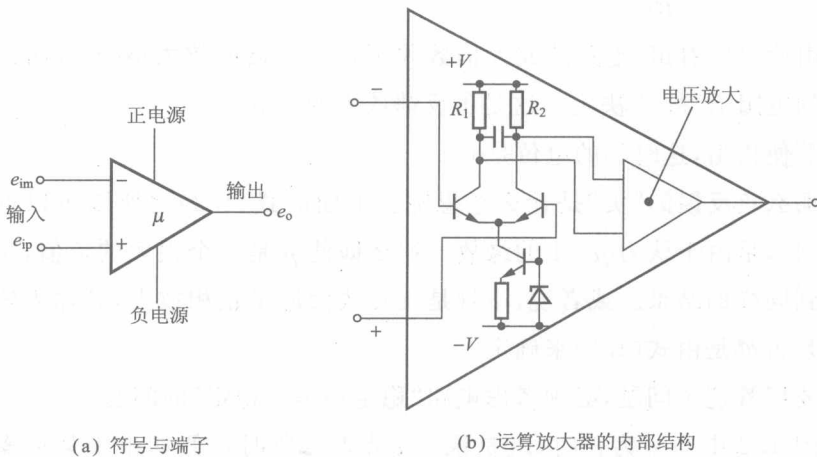


图 1.3 运算放大器的端子及内部功能