

〔美〕 J. V. 韦 特
L. P. 许尔斯曼 著
G. A. 科 恩

沈承杭 张子清 赵焕綏 江奋舰 译

运算放大器原理 和应用导论

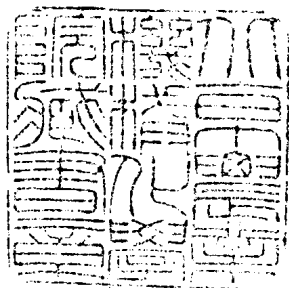
INTRODUCTION
TO OPERATIONAL AMPLIFIER
THEORY
AND APPLICATIONS

人民邮电出版社

7N720.2

运算放大器原理 和应用导论

[美] J.V. 韦特 L.P. 许尔斯曼 G.A. 科恩 著
沈承杭 张子清 赵焕绥 江奋舰 译



人民邮电出版社

J. H. WAIT L. P. HUELSMAN G. A. KORN
*Introduction to Operational Amplifier
Theory and Applications*
McGraw-Hill Book Company, 1975

内 容 提 要

本书是美国亚利桑那大学电子工程系高年级学生选修课“运算放大器电路设计”的教材。全书共分六章。分别介绍基本线性运算放大器电路；运算放大器的非理想性对电路性能的影响及其分析方法；非线性应用；有源RC滤波器；电子开关电路；数-模转换器和模-数转换器。

2585/17

运算放大器原理和应用导论

[美] J. V. 韦特 L. P. 许尔斯曼 G. A. 科恩 著

沈承杭 张子清 赵焕绥 江奋舰 译

审校者：谢沅清

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 1983年5月 第 一 版

印张：13 4/32 页数：210 1983年5月河北第一次印刷

字数：346 千字 印数：1—10,500 册

统一书号：15045·总2647—无6213

定价：2.05元

前 言

二十世纪六十年代,晶体管化固体运算放大器工艺得到飞速的发展。今天,在使用电子电路的广阔领域中(如放大、滤波、非线性波形整形、波形产生和开关电路等),这类微型放大器已成为基本的积木单元。本书可作为电子工程系高年级学生和毕业生的运算放大器电路设计教材,其目的在于讲授利用运算放大器、电阻器、电容器和其它所需专门元件所构成的电子电路的分析和设计技术。

本书不讨论运算放大器本身的内部设计,然而,对于因内部设计而引起的运算放大器的非理想性却颇为注意。本书假设读者已具备电子工程系高年级学生的同等学历。其中包括一些必备的知识,如拉普拉斯(Laplace)变换、频率响应算子、波德图(Bode Plots)和固体器件性能的基本知识。

本书对于实习电气工程师也是十分有用的,可作为自学读物和工作参考书。

第一章通过理想运算放大器模型,系统地介绍基本线性运算放大器电路的设计。本章通过若干例题复习一下重要的有源电路的分析方法。为了便于在第二章中处理非理想效应,仔细地定义了理想模型。从第三节开始,以下各节详细地讨论一些主要的电路结构,其中包括求和反相器、反相求和积分器(及其模式控制)、带有几个四端网络的广义反相放大器、同相放大器和差动放大器。第八节全面地讨论反相和同相求和放大器的组合,这在别处是不容易找到的。第九节叙述重要的一阶滤波器电路,但是把有源RC滤波器电路的详细处理推迟到第四章。最后一节提供几个常用的电路,如仪器用放大器、基准电压源和电压-电流转换器等。读者将会发现,许

多很好的习题将提供更有价值的应用。

第二章讨论放大器性能的局限性(非理想性)对电路性能影响的分析方法。首先提出一个一般的非理想的小信号线性模型,并讨论根据这一模型估算闭环增益和输入、输出阻抗的方法。接着讨论用以估算闭环稳定性的波德图法,并考虑补偿问题。第四节叙述共模效应。第五节叙述直流失调和温度漂移的影响,并叙述标准的补偿和平衡技术。第六节根据功率谱密度模型阐述随机噪声的影响;初读时,读者可以跳过这一部份,这是因为运用这一模型需要对于随机过程的理论有一些了解。第七节讨论大信号运用的限制,例如:摆动速率、满功率带宽、调整(建立)时间、过载恢复时间和最大共模电压等。最后三节介绍使用运算放大器时的一些实际考虑。第八节讨论提高输出功率的一些方法。第九节概述对电源的要求、接地和屏蔽问题。最后一节叙述线性电路设计中所用无源元件的一般特性。

第三章涉及到非线性电路的设计问题。本章提供一些非线性电路的设计方法,这些方法可能具有普遍意义。第一节回顾了二极管和晶体管折线化模型及其在某些简单实例中的应用。第二节讨论各种限幅器和比较器电路,并比较它们的优缺点。这节还包括利用滞后来抑制噪声的比较器的设计问题。第三节提供了产生折线函数的常用方法。第四节讨论对数运算器,以帮助读者了解这种非线性运算器的特殊应用。第五节叙述实现乘、除和平方的常用方法,对这些方法进行了比较,并指出其典型应用。最后,第六节收集了一些常用的波形产生电路。此外,许多例题和习题提供了一些补充应用。

其余几章概述了进一步的应用。第四章讨论有源 RC 滤波器,这是运算放大器比较重要的一种应用。第一节提出了一些一般的设计和分析方法。其中敏感度的讨论使读者能够评价实现滤波器的各种方案。随后两节提出了几个最重要的滤波器的结构。这包括萨伦—基(Sallen and Key)结构,以及无限增益多路反馈结构。第四

节概述实现高 Q 值有源 RC 滤波器的方法。介绍“状态变量法”和塔米-格沃西 (Tarmy-Ghausi) 这两种方法。本节也讨论了放大器带宽有限时对实现方案的影响。第五节概述了实现二阶以上的滤波器的级联技术。第六节和第七节讨论实现有源 RC 滤波器的其它方法,其中包括利用回转器或负阻抗转换器,以及运用广义阻抗转换器产生“与频率相关的负电阻器”(FDNR)这一近代技术。对于所有这些实现方法,都提供设计参数表,使读者很容易实现特定的滤波器结构,其中最常用的几种特性是,最大平坦幅度特性(Botterworth)、等波动特性(Chebchev)、最平时延特性(Thomson)和椭圆特性(Cauer)。给出了这些特性的直至六阶为止的近似表。在许多情况下,采用变通的方法,譬如,使用等值的 R 和 C 、使制造起来更容易,或者用整值增益以降低敏感度。还讨论了实现高阶滤波器的调整过程。本章中的许多参数表是以前未发表过的。其中,高阶滤波器特性的宽范围的二次因子的编纂工作更具有特别重要的意义。

第五章介绍最流行的电子开关电路,其中包括二极管、三极管、结型场效应管(JFET)、MOS场效应管(MOSFET)和CMOS场效应管开关电路。举例说明如何减小由于漏电流、导通电阻、电平偏移和开关尖峰所造成的误差。讨论了电子多路装置、取样保持电路和积分器控制开关,以及它们的误差来源和近代的设计方法。

第六章讨论数-模和模-数转换器。目前,这两者都是成本低廉且为系统设计师所不可缺少的。各节分别叙述数字码、负电压的表示方法、电压梯形电路、倒置梯形电路和电流梯形电路。然后叙述电流开关型单片集成电路数-模转换器的设计和应用、误差来源和调整(建立)时间。有关模-数转换器的主要形式的叙述包括一个简单的逐次逼近转换器的完整逻辑。最后一节说明如何去理解一个功能组件的技术指标。

作为每周三学时使用一学期的教材,这些内容显然是太多了。这是有意这样安排的,以便使本书既可以作为设计基础的深造的教

材，又可作为应用方面的概述教材。我们在亚利桑那州大学使用这个教材（由它产生了该书）作为高年级选修课程已达四年之久，取得了相当大的成绩。我们的作法是：第一、二章基础理论部份大约用一学期的40%的时间。在这部份，我们提供了很多习题。第三章的主要内容大约用20%的学时，主要目的在于加强学生运用折线化二极管、三极管模型设计和分析非线性电路的能力。其余的40%的学时，用来讲授第四、五、六章所述的各种应用。

其他教师可以根据特殊的数学目的，选择不同的重点。例如，第一、二、三章可以作为设计基础的一个良好的导论。实际上，第一章可单独地作为一个每周一学时的绪论教材单元。如果重点在于应用方面而不在于设计方面，可以跳过第二章。第一章和第四章合在一起，可以作为一个完整的有源RC滤波器设计方面的教材。第四章末尾提供的难度较大的习题要花较多的时间。同样，第一、五、六章可以作为模-数，数-模转换和数据获取系统的教材。

J.V. 韦特

L.P. 许尔斯曼

G.A. 科恩

目 录

前言.....	(1)
---------	-------

第一章 基本运算放大器电路

§ 1.1 运算放大器的一般特性	(1)
§ 1.2 理想放大器模型	(4)
§ 1.3 求和反相器	(7)
§ 1.4 反相求和积分器	(13)
§ 1.5 广义反相放大器	(25)
§ 1.6 同相放大器	(29)
§ 1.7 差动放大器	(33)
§ 1.8 反相和同相组合式放大器	(36)
§ 1.9 简单一阶传递函数	(42)
§ 1.10 各种线性应用.....	(50)
习题.....	(58)
参考文献.....	(73)

第二章 性能限制：非理想放大器

§ 2.1 一般的非理想线性模型	(75)
§ 2.2 闭环增益、输出阻抗和输入阻抗	(79)
§ 2.3 闭环稳定性；波德图法；补偿	(95)
§ 2.4 共模效应	(100)
§ 2.5 直流失调和温度漂移	(106)
§ 2.6 放大器内部噪声的影响	(113)
§ 2.7 大信号限制	(125)
§ 2.8 输出功率的提升	(129)
§ 2.9 供电、接地和屏蔽	(131)

§ 2.10 元件: 电阻和电容	(136)
习题	(138)
参考文献	(148)

第三章 非线性电路的应用

§ 3.1 一般的非线性设计方法	(150)
§ 3.2 反馈限幅器和比较器	(159)
§ 3.3 其它折线函数	(180)
§ 3.4 对数运算器	(205)
§ 3.5 乘法器、除法器及其应用	(214)
§ 3.6 波形的产生	(232)
习题	(249)
参考文献	(265)

第四章 有源RC滤波器

§ 4.1 一般设计和评价方法—敏感度	(267)
§ 4.2 二阶低增益放大滤波器	(277)
§ 4.3 二阶无限增益放大滤波器	(290)
§ 4.4 高 Q 值滤波器	(303)
§ 4.5 用级联方法实现高阶波滤波器—调整	(309)
§ 4.6 回转器滤波器和负阻抗转换器	(322)
§ 4.7 广义阻抗转换滤波器	(331)
习题	(340)
参考文献	(344)

第五章 电子开关电路

§ 5.1 引言	(345)
§ 5.2 理想开关和实际开关电路	(345)
§ 5.3 二极管开关电路	(349)
§ 5.4 双极晶体管开关(文献1)	(351)
§ 5.5 结型场效应晶体管(JFET)开关	(354)
§ 5.6 MOS场效应晶体管(MOSFET)和CMOS集	

成电路	(358)
§ 5.7 几个改进的开关电路	(361)
§ 5.8 取样保持电路	(364)
§ 5.9 积分器模式控制和有关的开关电路	(368)
参考文献	(373)

第六章 数字-模拟和模拟-数字转换器

§ 6.1 电压的数字表示; 简单转换电路	(374)
§ 6.2 实际的数字-模拟转换器; 电压梯形电路	(379)
§ 6.3 电流开关数-模转换器	(388)
§ 6.4 静态误差指标	(389)
§ 6.5 数-模转换器调整(建立)时间的讨论; 尖峰和起 伏 (<i>Glitches</i>)	(391)
§ 6.6 模-数转换器	(394)
§ 6.7 并行比较器和串行编码模-数转换器	(395)
§ 6.8 斜坡比较式转换器	(397)
§ 6.9 积分式转换器	(398)
§ 6.10 采用数字-模拟反馈的模拟-数字转换器	(400)
§ 6.11 模拟-数字转换器的技术指标和比较	(404)
习题	(406)
参考文献	(407)

第一章 基本运算放大器电路

自六十年代以来，固体直流运算放大器对电子电路设计人员来说显得越来越重要了。目前，这类微型放大器（图1.1），性能可靠、坚固，而且使用方便，因此它已成为电子电路的基本积木单元，广泛地应用于放大、滤波、非线性波形、整形、波形产生以及开关电路等领域中。今天，聪明的电路设计人员不再用许多分立元件去组装放大器，而常常是用市场上能买得到的几个已经封装好的标准运算放大器去研制电路。运算放大器构成电路的有源元件，电路的其余部分由电阻、电容、二极管及所需要的其它特殊元件组成。

采用上述标准的有源元件，就不需要对每一个晶体管级进行详细的设计。如果使用得当，则电路的全部传递特性（增益、频率响应等），就可由稳定的无源元件（例如：电阻、电容、二极管）来精确地控制。由于电路中采用反馈技术来减小运算放大器的任何非理想性所造成的不良影响，所以实际的运算放大器内部的各种变动，几乎不影响整个电路的性能。因此，利用运算放大器设计的电路，其实际性能通常和理论计算结果极为接近。

把电路的大部分有源元件集中到现代固体运算放大器所占有的这样一个小空间里，促进了电子电路的微型化。此外，现代运算放大器是极其可靠的。如果电路设计者选择优良的运算放大器，那么，可以预期所有批量生产的成品，都能与样机的性能相媲美，只需在开始工作时作些微小的调整，随后，在短期内，稍加维修就可以了。

§ 1.1 运算放大器的一般特性

某些典型运算放大器组件如图1.1所示。这些组件是采用两种

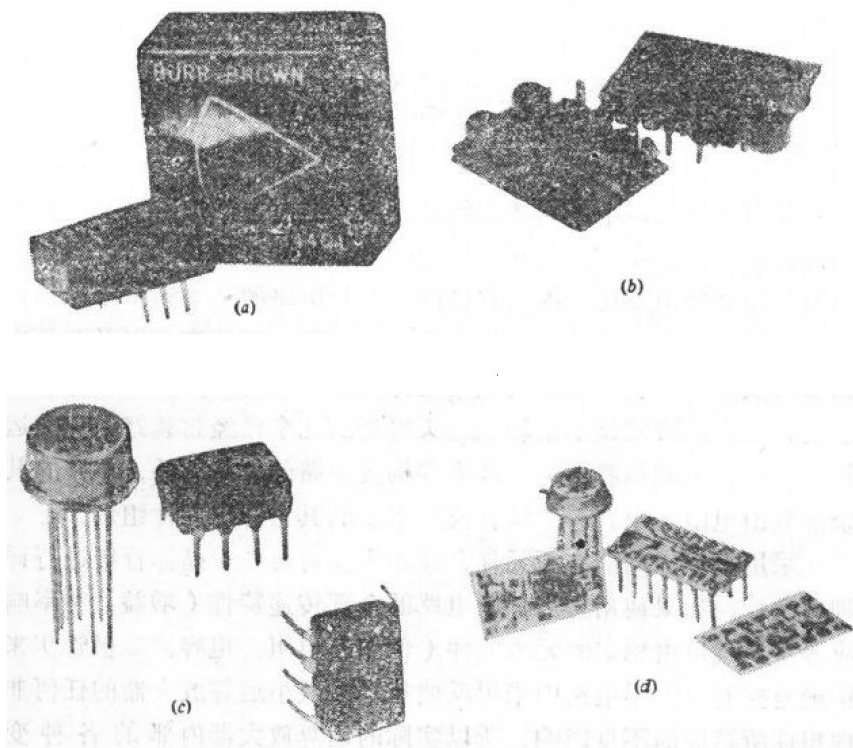


图 1.1 运算放大器组件。(a)用分立元件制造、并用环氧树脂封装的放大器；(b)分立元件电路单元的内部结构；(c)集成电路组件的典型封装；(d)混合结构。

基本方法制造的：分立元件和集成电路。图1.1 a 是一个由分立元件（晶体管和电阻）构成、并用环氧树脂封装的放大器。在这种结构中，通常把元件装配在一些小的印刷电路板上（图1.1 b），连接插头固定在一块板上，整个部件用密封材料封装。其中，分立元件既可采用双极晶体管，也可采用场效应晶体管（FET）。集成电路运算放大器一般采用常规的单片集成电路技术制造，可封装在TO-99型圆形晶体管管壳中，或用环氧树脂覆盖双列直插式封装（图1.1 c）。也可采用薄膜、厚膜和（或）单片集成电路混合技术制造（图

1.1d)。

本书不讨论运算放大器本身的设计方法，有关现代固体运算放大器内部设计的资料，读者可参看文献1~3。本书中，我们最关心的是运算放大器在信号处理工作方面的一些应用（文献1、3~6和12可以作为希望进一步了解运算放大器的参考书）。

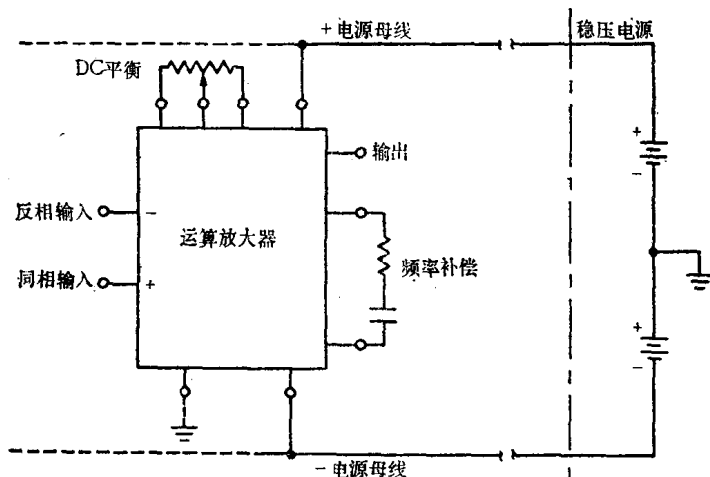


图 1.2 运算放大器的典型连接方式。本图画出了供电和连接（并非总是必要的）外部平衡和补偿网络的典型方法。几个放大器可以一起由两个正负对称的稳压电源供电。

图 1.2 画出了运算放大器工作时典型的外部连接方式。一个给定系统中的几个运算放大器，往往由正负对称的两个直流稳压电源（例如， $\pm 15V$ ）通过低阻抗直流母线供电。虽然在典型运用时，所有信号都以电源的公共地电位为基准，但有时运算放大器外壳上还提供了一个内部接地引线（请参看 § 2.9 中有关供电和接地系统的详图）。运算放大器通常具有两个输入端（反相输入端和同相输入端）和一个输出端。此外，有时还备有一些引出线，用以连接频率响应补偿网络和直流失调平衡网络。

图 1.3 画出了本书中使用的运算放大器常规符号。图中只标出了主要的信号端，放大器所需要的其它连线（如电源等）假定是按照

放大器的制造者所规定的方式连接的。

表1.1列出了一个运算放大器通常必需具备的一些特性。

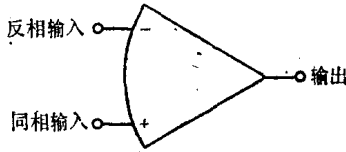


图 1.3 运算放大器的常规符号；只画出了主要信号线全部信号以地为基准。

表1.1运算放大器的特性

1. 在包括直流在内的低频范围内，电压增益要高，线性要好；直流开环增益为 10^7 或更高。
2. 输入和输出之间有极性反馈。在某些情况下，在组体外部不提供同相输入端，但是，为了引进差动输入，最好是既提供反相输入端，也提供同相输入端。
3. 直流失调要小。也就是说，当输出电压为 0 时，输入电压（图1.4C的 e_s ）应接近于 0（完善的直流平衡）。应当采用温度补偿技术（在某些情况下，采用斩波稳定系统），以保证直流平衡的长期稳定性。电源电压变化所引起的漂移也要小。
4. 应当谨慎地控制高频响应，以便于放大器加很深的负反馈。
5. 两个输入端之间的差动阻抗以及各输入端和地之间的共模阻抗应当足够高。
6. 放大器的输出阻抗应当足够低。
7. 在某个双极性（ $\pm$ ）标称电压范围内（譬如 $\pm 10V$ ），放大器输出级应当能够把规定的最大电流传给输出端负载，或者从负载吸收这一电流。
8. 差动输入时，共模抑制能力要好，即输出只取决于两个输入电压之差，而几乎与两个输入电压中同相分量的大小无关。

§ 1.2 理想放大器模型

本章将介绍所谓理想运算放大器模型（图1.4b或c）。下一章将叙述对实际运算放大器来说是很重要的非理想特性，并讨论这种非理想性对电路性能影响的估算方法。然而，在本章中，几乎完全忽略运算放大器的非理想特性，并按照我们的设想来描述一个运算放大器。首先假定了放大器没有内部直流失调，也不显现非线

性。根据这一假定，我们可以十分圆满地用图1.4 a 所示的理想线性模型来表示运算放大器。在这里，可以看到，运算放大器是一个有源器件。输出端的戴维宁等效电路由一个理想的受控电压源 $-Ae_g$ 和一个等效输出阻抗 z_0 串联组成。输入端是一个由 Z_{cm1} 、 Z_{cm2} 和 Z_i 组成的无源等效电路，其中， Z_{cm1} 和 Z_{cm2} 为每一输入端和地之间的共模阻抗， Z_i 为两输入端之间的差动（或称差模）输入阻抗。

在本章中，采用图1.4 b 和 c 所示的更简单的模型就足够了。在图1.4 b 中，我们假定各输入端的内阻抗大到可以忽略的程度；而输出端的内阻抗则小到可以忽略的程度。因而，只剩下输出端的等效电压源 $-Ae_g$ 。在本章的其余部份，我们将采用图1.4 c 所示的更为方便的表示方法，图中放大器各端的电压 e_1 、 e_2 和 e_0 都以公共地为基准。

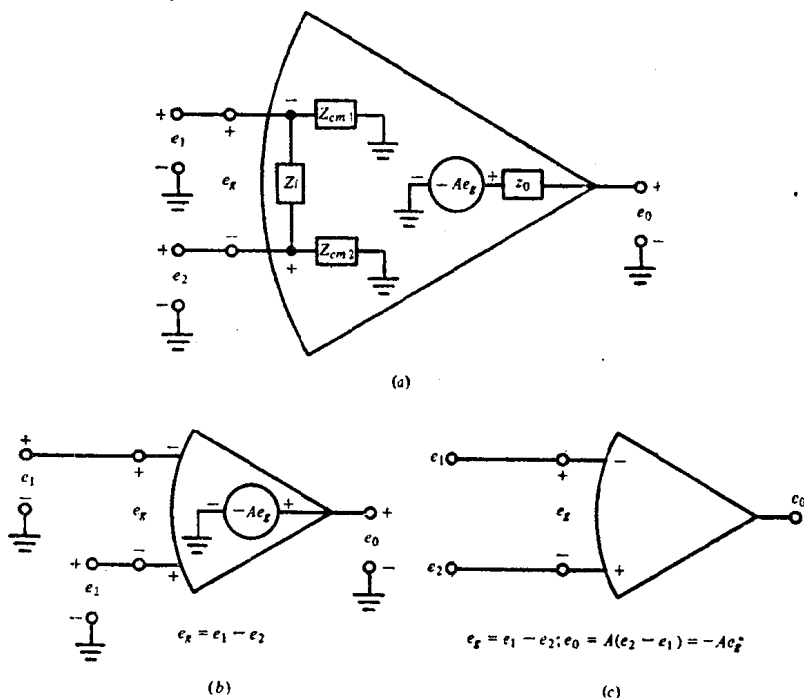


图 1.4 运算放大器电路模型。(a)详细的线性模型；(b)忽略内阻抗的简化模型；(c)简化模型的简略表示法，图中电压 e_1 、 e_2 和 e_0 以地为基准。

现将理想运算放大器模型概述如下：

1. 理想运算放大器为一个线性的电压控制电压源 (VCVS)，对于该电压源

$$e_o = A(e_2 - e_1) = -Ae_s \quad (1.1a)$$

式中, $e_s = (e_1 - e_2)$ (1.1b)

e_s 为放大器两输入端之间的差动电压。

2. 假定放大器的开环电压增益是一个很大的常数，即

$$A \gg 1 \quad \text{基本上可认为是无穷大} \quad (1.2)$$

3. 在(1)中隐含着这样一个假定，即放大器的输入端基本上是开路控制节点，也就是 e_1 和 e_2 两端之间的阻抗为无穷大，每个输入端和地之间的阻抗也是无穷大，于是输入端电流为零。

4. 在(1)中也隐含着这样一个假定，即放大器输出电压不受外接负载的影响。

注意：由于我们已对极性作了如图1.4所示的选择，因而在低频范围可以把放大器的开环电压增益 A 看作一个大的正常数。(1.1)式已经确定了各输入端之间的极性关系，因而，考虑图1.4a或b中戴维宁等效电压源的符号时，电源电压为 $-Ae_s$ 。希望读者彻底弄清楚这一点，否则写电路方程时，很容易发生错误。必须记住， e_1 接于反相端； e_2 接于同相端。

如§1.1所指出的，运算放大器通常是接在具有很深的负反馈的电路中（特别是在低频时）。反馈的作用使放大器的性能更理想。也就是说，反馈抑制了直流失调，改善了放大器的线性，使放大器对输出端的外负载不敏感，并迫使差动输入电压 e_s 接近于零，因而输入电流很小。

如果电路设计者很好地理解了这一模型，并采用一些基本设计措施，以保证能在整个电路设计中引入适量的负反馈，他将会发现，理想模型对于他的初步设计估算，是十分有效的。

注意：尽管由(1.1)式、(1.2)式和图1.4b描述的模型，对于分析来说就足够了，但是仍然需要知道各端对地的电压所允许的

变化范围,特别是最大输出电压的摆幅,其典型值为 $\pm 10V$ 。在某些特殊应用中,输入电压 e_1 和 e_2 的最大允许摆幅也很重要。还常常需要考虑放大器能够输出的电流。

当然,理想模型在实用中是实现不了的。如果理想模型不能十分圆满地说明电路的性能,那么,就得考虑表1.1所提出的许多问题。读者可能关切地问:放大器的电压增益实际上是多大?的确,这是一个很重要的问题。一般说来,在低频时,电压增益可以很高,也许可高达 10^6 或 10^8 。当然,在高频时,电压增益较小,并且包含相移。在第二章中,将详细地研究增益 A 随频率变化的一些细节。然而,在许多简单应用中,(1.1)式和(1.2)式的假定,至少对于进行电路的初步估算来说是足够了。

§ 1.3 求和反相器

在正常情况下,运算放大器不能开环运用,可以用某种形式的反馈来控制整个电路的传递特性。由于开环增益很高,甚至以很小的输入信号去激励处于开环状态的放大器(图1.5),它的输出电压也要饱和(幅度过载);事实上,如果没有反馈,微小的内部直流失调(它总是存在的)就足以引起过载。

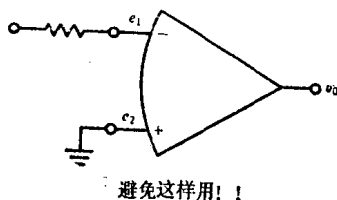


图 1.5 正常情况,应当避免这样连接电路,因为运算放大器不能没有反馈而开环工作。

典型反相运算放大器电路如图1.6a所示。对于单端运用来讲,同相端或者直接接地,或者通过漂移补偿电阻接地(见§2.5)。图1.6b是经常使用的简化图,图中假定了同相端真正是地电位,并假定全部电压都以该地电位为基准。在这里,对整个电路外部节点上的电压也采用上述原则。

推导传递函数方程时,我们作如下三个基本假定: