

集成运算放大器实用基础

王泳涛 编

化学工业出版社

本书从应用角度介绍了集成运算放大电路的基本理论,包括功能分析、误差分析和频率补偿;分析了仪表中常见的典型运放线路;结合运放的内部结构,还介绍了分立元件电路。内容取材结合工业控制仪表;叙述体系以集成为主;分析方法注重于基本电路理论,引用了信号流程图,因而概念明确、启发思路。

本书可供石油、化工、热电等部门从事自动化和仪表工作的人员阅读,也可供大专院校化工自动化及仪表等专业的教学人员参考。

集成运算放大器实用基础

王泳涛 编

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $11^{3/8}$ 字数252千字印数1—12,000

1984年3月北京第1版1984年3月北京第1次印刷

统一书号15063·3496定价1.20元

前 言

目前, 电子式工业自动化仪表的发展日新月异, 新的品种和型号不断涌现, 分立元件电子线路已经广泛地用集成运放电路来代替。面对迅速发展的形势, 要求从事自动化和仪表工作的人员必须具有善于使用新型仪表的能力。尽管仪表线路变化多端, 但我们相信, 只要掌握基本的电路形式和分析方法, 具有一定的理论基础, 就能触类旁通, 有能力适应仪表的发展和线路的变化。本书结合工业控制仪表, 从使用角度出发, 介绍了集成运放电路的基本理论和典型线路。考虑到目前多数仪表仍是集成-分立混合使用, 本书也介绍了一些分立元件电路。

本书的宗旨是提高读者分析仪表线路的能力。为了达到这个目的, 我们力求做到两个“注重”: 一是注重与实际仪表相结合, 二是注重基本电路理论的运用。

为了结合仪表实际, 保证学以致用, 本书中的许多典型线路都是取材于 DDZ-Ⅲ 型或其他系列的调节控制仪表。通过这些线路的分析, 将引导读者善于简化实际电路并归结为典型的基本电路, 从而提高读图能力。

在本书中, 不管使用的元件是集成还是分立, 我们仅仅采用了有限几个基本电路理论(基尔霍夫电流和电压定律、等效电源定理即戴维宁-诺顿定理、叠加原理)去统一分析所有线路, 因此, 既有助于读者掌握电子线路的分析方法, 又不涉及过多的电路理论。此外, 我们还引用了自动化工作

者熟悉的信号流程图来分析线路，以求收到思路清晰、概念明确的效果。

全书共分五章。在第一、四、五章中，集中介绍集成运放电路的基本理论，包括功能分析、误差分析和频率补偿技术。在第二章中，介绍目前调节、检测仪表中常见的典型运放电路。第三章中介绍集成运放和集成稳压的内部结构；与此同时，又结合介绍了分立元件电路，对于差分和反馈则讲得更多些，因为它们也是集成运放的重要基础。在论述体系上，我们没有按照电子元件发展历史的先后顺序（先“分立”、后“集成”）来展开内容，而是以“集成”带“分立”，重点放在“集成”上。

为了便于复习检查，书后附有各章的习题。大部分习题来源于仪表线路，因而又起到了扩大知识面的作用。

本书的大部分内容是根据近几年浙江大学化工自动化专业“电子技术”课程的讲稿整理而成的，初稿曾作为一九八〇年化工部引进装置自动化仪表培训班的基础课讲义；根据先后两次按初稿试讲的经验，这次再进行了修改。浙江大学化工系副主任林新民副教授，对本书的编写进行了具体指导，定稿后又作了仔细审查。在以往的教学实践中，得到了教研组同志的协助和鼓励。谨在此一并表示深切谢意。

由于水平有限，错误难免，欢迎批评指正。

编者

1981年8月

目 录

前 言

第一章 集成运放的工作原理	1
第一节 集成运放的性能	1
一、引出端	1
二、基本特性	3
第二节 基本运放电路	6
一、负反馈原理	6
二、运放电路的基本形式	8
三、闭环输入电阻和输出电阻	10
第三节 运算关系的分析	11
一、反相和同相运算放大器	11
二、差动运算放大器	14
三、分析运算关系的技巧	17
第四节 单电源供电	19
一、单电源供电时集成运放的使用条件	19
二、单电源供电的运放电路	22
第二章 运放电路的应用	27
第一节 模拟运算电路	27
一、比例运算电路	27
二、加法和减法运算电路	29
三、积分运算电路	32
四、微分运算电路	43
第二节 信号处理电路	49
一、电压比较器	49

二、线性整流电路	53
三、峰值选择器	55
四、折线电路	57
五、函数发生器	64
第三节 信号变换电路	70
一、电流和电压的相互变换	70
二、电压-频率转换器	80
三、电压-脉冲宽度转换器	86
第四节 其他应用电路	89
一、信号发生器	89
二、跟踪电路	92
三、交流放大器	94
第三章 集成运放的基础电路	96
第一节 二极管和稳压管	96
第二节 三极管	102
第三节 三极管电流源	116
第四节 三极管的偏置技术	126
第五节 基本放大单元	135
一、共发射极放大器	135
二、射极输出器	139
第六节 集成运放的输出电路	142
第七节 差分电路	147
一、差分电路的基本原理	147
二、具有恒流源的差分电路	161
第八节 集成运放中的差分输入级	165
一、差分电路的传输特性	165
二、差分输入级的电路形式	169
第九节 差分电路的失调和漂移	175
第十节 负反馈电路的分析	179

第十一节 集成运算放大器电路介绍	195
一、5G24运放简介	195
二、8FC3运放简介	202
第十二节 场效应管及其应用	205
一、场效应管的特性	205
二、场效应管恒流源	208
三、场效应管放大器	210
第十三节 高输入阻抗运算放大器	213
第十四节 集成稳压电源	218
第十五节 三极管和场效应管开关	225
第四章 运放电路的误差分析	230
第一节 集成运放的参数和模型	230
第二节 运放电路误差分析的方法	242
第三节 集成运放主要参数的测试	259
第五章 运放电路的频率特性	273
第一节 频率特性	273
一、频率特性的概念	273
二、波特图	276
第二节 运放频带宽引起的误差	295
第三节 运放电路的稳定性	301
第四节 频率补偿技术	313
习 题	326
附 录 分析电子线路时常用的几个概念和方法	352

第一章 集成运放的工作原理

集成电路运算放大器（简称集成运放或运放）是一个已经装配好的高增益直接耦合放大器。它作为一个具有放大器功能的元件，加接反馈网络后，就组成了运算放大电路（简称运放电路）。运放电路的输入-输出关系仅仅决定于反馈网络，只要选择合适的反馈网络就能实现需要的运算。本章将介绍集成运放的性能、运放电路的基本形式和分析方法。

第一节 集成运放的性能

在线路图中，集成运放用图 1-1 所示的三角形符号来表示。从应用的角度看，可以暂时不管它的内部结构，主要关心其引出端（管脚）的用途、性能和极限使用条件。

一、引出端

每个集成运放有五个基本的引出端（见图 1-1），它们的用途和使用条件如下。

（1）电源端 通常，由正负双电源 V_+ 和 V_- 供电，典型电源电压为 ± 15 、 ± 12 、 $\pm 6V$ 。

（2）输出端 集成运放只有一个输出端，称为单端输出。在输出端和地（正负电源公共端）之间获得输出电压

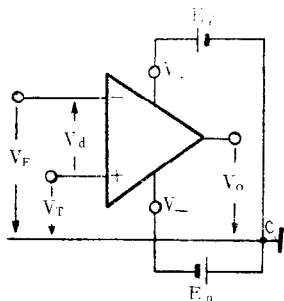


图 1-1 集成运放的引出端

V_o 。为了保证集成运放正常工作，输出端的电压、电流都有一定的限制，最大输出电流（又称额定输出电流）一般为5mA或10mA，最大输出电压（又称额定输出电压）一般比电源电压低1~2V。

（3）输入端 通常有两个输入端（标记为+、-），称为双端输入。个别的只有一个输入端，可理解为（+）端接地、（-）端输入。

我们规定，（+）（-）端之间电位差 V_d 的正方向是从（+）端到（-）端，输出 V_o 的正方向是从输出端到地。 V_o 的极性决定于 V_d ： $V_d > 0$ 时 $V_o > 0$ ； $V_d < 0$ 时 $V_o < 0$ 。因此，（+）端称为同相输入端，（-）端称为反相输入端。

根据下面两式，同相端输入电位 V_r 和反相端输入电位 V_F 可以分解为两个分量的叠加，

$$V_F = \frac{V_r + V_F}{2} - \frac{V_r - V_F}{2} = V_c - \frac{V_d}{2} \quad (1-1)$$

$$V_r = \frac{V_r + V_F}{2} + \frac{V_r - V_F}{2} = V_c + \frac{V_d}{2} \quad (1-2)$$

式中， $V_d = V_r - V_F$ ，即是（+）（-）端电位差，称为差模输入电压； $V_c = \frac{V_r + V_F}{2}$ ，即是（+）（-）端电位的平均

值，称为共模输入电压。图 1-2 是相应于上述两式的等效电路。下面将看到，集成运放对 V_d 和 V_c 具有不同的放大能力。

任何一个集成运放，允许承受的 V_d 和 V_c 都有一定限制。制造厂规定了运放的最大差模输入电压（又称差模输入范围）和最大共模输入电压（又称共模输入范围），使用时如果超出规定的允许范围，集成运放将不能正常工作，甚至造成永久性损坏。

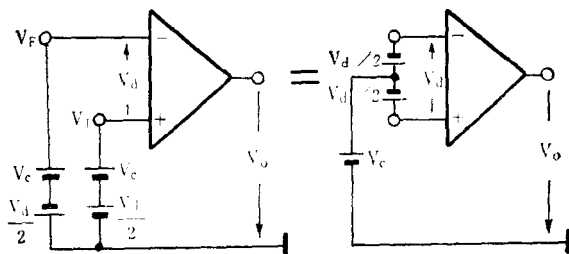


图 1-2 差模输入和共模输入的等效电路

除了上述主要引出端以外，集成运放还有用于输出调零、相位补偿的引出端，在一般原理图中没有画出。在许多线路中，往往连电源端也不画，把集成运放看作只有输入、输出的三端器件。

二、基本特性

在研究信号源、集成运放、负载之间的相互关系时，集成运放可以用图 1-3 所示的模型来代表。对信号源来讲，

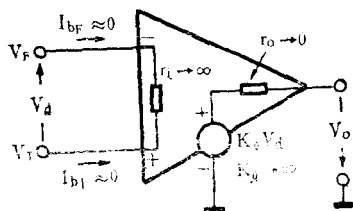


图 1-3 集成运放简化模型

集成运放相当于一个等效电阻 r_i ，称为输入电阻；对负载来讲，集成运放可以看作一个由电压源（大小受输入电压控制）和内阻 r_o （称输出电阻）串联起来的等效电源。

它具有以下的基本性能：

(1) (+)、(-)端的输入电流很小，通常小于 $1\mu\text{A}$ ，可认为 $I_{bF} \approx 0$ 、 $I_{bI} \approx 0$ 。不言而喻，在信号电压作用下它们的变化量也极小，所以集成运放的输入电阻趋于无穷大，即 $r_i \rightarrow \infty$ 。

(2) 负载变化时输出电压 V_o 几乎不变。这表明输出电

阻很小, 即 $r_o \rightarrow 0$ 。

(3) 输入、输出之间具有下列关系

$$V_o = K_o V_d = K_o (V_T - V_F) \quad (1-3)$$

式中, K_o 是集成运放的电压增益 (绝对值)。

如果 $V_T = V_F = 0$, 则 $V_o = 0$ 。这表明零输入时零输出。

如果 $V_T = V_F = V_c$, 则 $V_d = 0$ 、 $V_o = 0$ 。这说明集成运放对共模输入电压 V_c 没有放大能力。

如果 $V_T \neq V_F$, 则 $V_d \neq 0$ 、 $V_o \neq 0$ 。这表示集成运放对差模输入电压具有放大能力。

通常 K_o 很大 ($K_o \rightarrow \infty$), 约 $80 \sim 120\text{dB}$ (即 $10^4 \sim 10^6$ 倍), 而 V_o 又受最大输出电压的限制, 因此 V_d 很小, 即 $V_d \approx 0$ 或 $V_T \approx V_F$ 。不管运放电路具体形式如何, 只要集成运放工作在放大状态, 就一定具有 $V_d \approx 0$ 这个特征。

集成运放虽然对 V_c 没有放大作用, 但并不是说 V_c 可以是任意值, V_c 的大小必须限制在共模输入范围以内, 否则不能正常工作, 其原因将在第三章中讨论。在 $K_o \rightarrow \infty$ 、 $V_T \approx V_F$ 的条件下, $V_c = (V_T + V_F)/2 \approx V_T \approx V_F$, 这就是说, (+)、(-) 端的电位必须在共模输入范围以内。

综上所述, 理想化的集成运放具有 $I_{bT} = I_{bF} = 0$ 、 $r_i = \infty$ 、 $r_o = 0$ 、 $K_o = \infty$ 、 $K_c = 0$ (K_c 指对共模输入的增益)、无失调 (即零输入时零输出) 等一系列特点, 实际的集成运放当然不可能如此, 但又很接近。

例 1-1 在图 1-1 中, $\pm 15\text{V}$ 供电, 集成运放的 $K_o = 106\text{dB}$ (即 2×10^5 倍)、额定输出电压 $\pm 13\text{V}$ 、共模输入范围 $-13 \sim +7\text{V}$ 。对应于下列各种输入情况, 求输出电压的大小和极性: (a) $V_F = -10\mu\text{V}$ 、 $V_T = -25\mu\text{V}$; (b) $V_F = +1.00001\text{V}$ 、 $V_T = +1.00000\text{V}$; (c) $V_F = 1\text{mV}$ 、 $V_T = 0\text{V}$;

(d) $V_F = 0V$ 、 $V_I = 1mV$; (e) $V_F = 8.00001V$ 、 $V_I = 8.00000V$ 。

解 (a) $V_d = V_I - V_F = -10\mu V$

输出 $V_o = K_d V_d = -10\mu V \times 2 \times 10^5 = -2V$

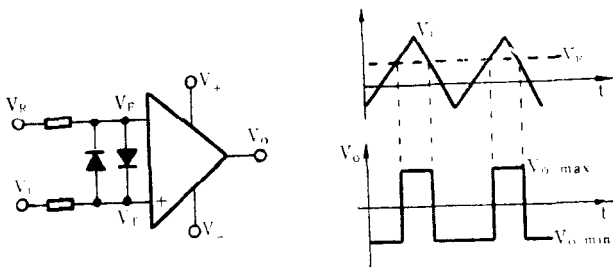
(b) $V_d = -10\mu V$ 、 $V_o \approx 1V$ 。集成运放不放大 V_o 、只放大 V_d ，因此 V_o 值和 (a) 相同。

(c) $V_d = -1mV$ 。输入过大，输出被限制在最大输出电压 $-13V$ 。集成运放处于负向饱和。

(d) $V_d = +1mV$ 。输出被限制在 $+13V$ ，方向和 (c) 相反。

(e) $V_o \approx 8V$ 。 V_o 已超越共模输入范围，集成运放不能正常地放大。

例 1-2 图1-4(a) 是一个用来鉴别两个信号电平高低的比较器， V_R 是门限电压， V_I 是被测信号。说明线路的动作原理。



(a) 电路

(b) 动作情况

图 1-4 单门限比较器

解 这里的集成运放开环工作，不处于放大状态。正如图1-4(b) 所示，当 $V_I > V_R$ 时， $V_I > V_F$ ，输出正向最大值

$V_{o, \max}$; 当 $V_i < V_R$ 时, $V_F > V_T$, 输出负向最大值 $V_{o, \min}$ 。可见, 利用 V_o 的正负能够判别 V_i 和 V_R 的相对大小。

电路中的两个二极管把 (+)、(-) 端之间的输入电压限制在 0.7V (二极管导通压降) 以内, 防止集成运放输入过高而损坏。

第二节 基本运放电路

一、负反馈原理

运放电路的理论依据是负反馈, 这里简单介绍它的基本原理。

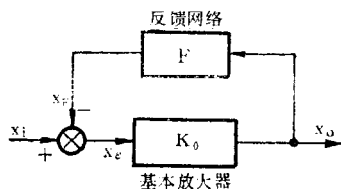


图 1-5 负反馈方框图

图 1-5 是反馈电路的一般形式, 整个电路叫闭环放大器。与此相应, 图中的基本放大器叫开环放大器, 它的增益是 K_0 , 净输入是 x_e , 其输出为:

$$x_o = K_0 x_e \quad (1-4)$$

从输出 x_o 取样, 经反馈网络, 得到反馈信号:

$$x_F = F x_o \quad (1-5)$$

输入信号 x_i 和反馈信号 x_F 进行比较后获得净输入:

$$x_e = x_i - x_F \quad (1-6)$$

由上述三式求得闭环电路的输入、输出关系:

$$K_F = \frac{x_o}{x_i} = \frac{K_0}{1 + K_0 F} \quad (1-7)$$

如果 x_F 和 x_i 的实际方向相反, 致使 $|x_e| < |x_i|$, 则称为负反馈, 这时 $K_F < K_0$ 。如果 x_F 和 x_i 的实际方向相同, 致使 $|x_e| > |x_i|$, 则称为正反馈。

在负反馈情况下，如果回路增益 $K_0 F \gg 1$ （称为深度负反馈），则

$$K_F = \frac{x_o}{x_i} \approx \frac{1}{F} \quad (1-8)$$

上式表明，闭环电路的输入、输出关系 K_F 仅仅取决于反馈网络 F ，而与开环增益 K_0 没有关系。应该指出， F 可以是电阻网络或 RC 网络，还可以含有二极管等非线性元件，相应地 K_F 也应该广义地理解。图 1-5 中的开环放大器如果采用集成运放，满足 $K_0 F \gg 1$ 是不成问题的，因而，只要改变反馈网络 F 的形式和参数，就能实现各种各样的运算关系。正因为如此，集成运放获得了广泛的应用。

根据式 (1-5)、(1-8)，我们又得到

$$x_i \approx x_F \text{ 或 } x_e \approx 0 \quad (1-9)$$

可见，深度负反馈放大器的净输入近似于零。今后将看到，利用这个特点来推算负反馈电路的输入-输出关系，是相当方便的。

采用集成运放作为开环放大器以后，式 (1-9) 将表现为 $V_d \approx 0$ 。在第一节中曾指出，为了保证集成运放工作在放大状态，要求 V_d 小到趋近零；而负反馈系统将能够自动地提供那么小的 V_d 信号。通常，集成运放总是闭环工作。

在负反馈电路中，从输出侧取得的反馈信号可以正比于输出电压，也可以正比于输出电流，前者称电压反馈，后者称电流反馈。在输入侧，输入信号和反馈信号可以电压比较也可以电流比较。在线路形式上，电压比较表现为串联，故称串联反馈；电流比较表现为并联，故称并联反馈。上述各种接线方式相互组合的结果，形成了负反馈电路的四种基本形式：电压串联负反馈、电流串联负反馈、电压并联负反

馈、电流并联负反馈。

二、运放电路的基本形式

运放电路是由集成运放这个器件加上负反馈网络后组成的，实质上是一个深度负反馈系统。对应于四种不同的负反馈形式，产生了如图1-6至图1-9所示的四种运放电路基本形式。在这些线路中，反馈信号都是加到运放反相端，从而实现了负反馈。

从输入方式看，在图1-6和图1-8中，信号从同相端输入，称为同相输入；在图1-7和图1-9中，信号从反相端输入，称为反相输入。

从输出侧取样方式看，图1-6和图1-7属于电压反馈，图1-8和图1-9属于电流反馈。在图1-6和图1-7中，输出电压 V_o （即负载 R_L 两端的压降）经 R_1 和 R_2 分压后提供反馈信号，反馈信号的大小正比于 V_o ，它是否存在依赖于 V_o ；设想短接 R_L ，令 $V_o=0$ ，则反馈信号也消失。在图1-8和图1-9中，反馈信号取自 R_F 上的压降 $I_L R_F$ （ I_L 是流过负载 R_L 的电流， R_F 常称为电流取样电阻），可见，反馈信号的大小正比于 I_L ，它的存在依赖于 I_L ；设想断开负载，令 $I_L=0$ ，则反馈信号

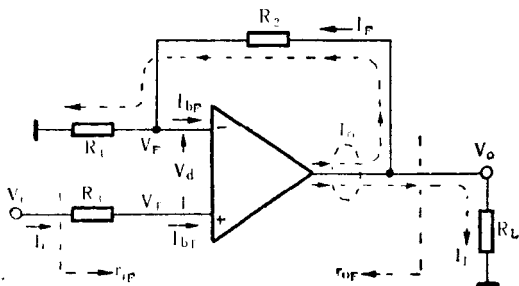


图 1-6 电压串联负反馈的实例

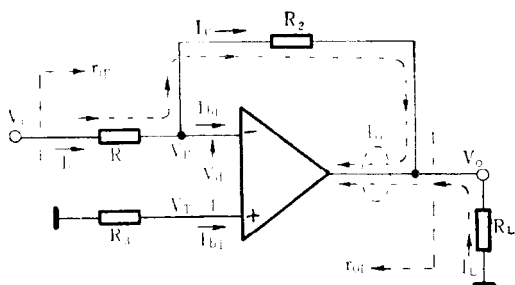


图 1-7 电压并联负反馈的实例

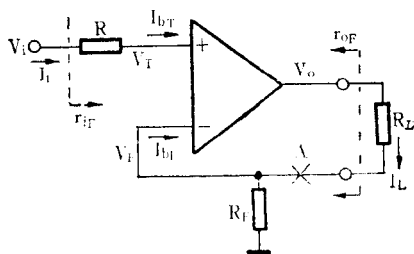


图 1-8 电流串联负反馈的实例

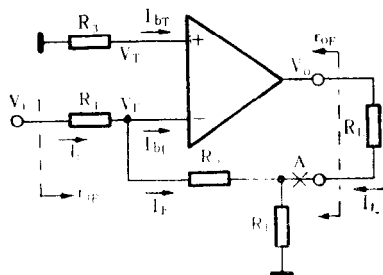


图 1-9 电流并联负反馈的实例

也随之消失。

从输入侧比较方式看，图1-6和图1-8属于串联反馈，输入电压 V_i 和反馈电压 V_F 反向串联以后形成集成运放的输入电压 V_d 。图1-7和图1-9属于并联反馈，流经 R_1 的输入电流 I_i 和流经 R_2 的反馈电流 I_F 在反相端相减。

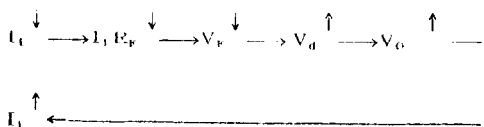
综上所述，图1-6属于电压串联负反馈，图1-7属于电压并联负反馈，图1-8属于电流串联负反馈，图1-9属于电流并联负反馈。显而易见，同相输入是串联反馈，反相输入是并联反馈。

三、闭环输入电阻和输出电阻

上述四种基本的运放电路形式，并非仅仅是反馈方式的排列组合，而是实际应用的需要。它们具有不同的性能，适应于不同的用途。

在图1-6和图1-7中，电压负反馈总是力图维持输出电压不变。当负载 R_L 变化的时候，比方说 R_L 减小，引起 V_o 趋于减小，经过反馈后 V_F 减小，而 V_F 的减小又迫使 V_o 向原来值增加，结果保证了 V_o 不随 R_L 而变化。可见，具有电压负反馈的运放电路，其输出具有电压源性质 (R_L 变化时 V_o 不变、 I_L 变化)，或者讲闭环输出电阻很小， $r_{oF} \rightarrow 0$ 。

在图1-8和图1-9中，电流负反馈总是力图维持输出电流不变。当负载 R_L 变化而引起 I_L 变化时，例如 I_L 减小，线路中 will 产生下列的负反馈过程：



可见， I_L 大小不受 R_L 变化的影响。因此，具有电流反馈