

Integrated

Operational Amplifiers circuit

着重介绍了运算放大器的基本应用及各个领域的应用电路

电路设计合理、线路简捷、功能完善

原理图标注详细清晰，易于理解和掌握



卿太全 编著

集成运算放大器 应用电路

集萃



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

集成运算放大器 应用电路集萃

卿太全 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着集成运算放大器性能的不不断提高及种类的不断增多,运算放大器的应用领域越来越广。为适应这种需要,掌握或了解运算放大器基本原理和各种类型的运算放大器的基本原理及应用大有必要。本书着重介绍了运算放大器的基础、基本应用及涉及各个领域的应用电路。本书力求做到电路设计合理、线路简洁、功能完善,原理图标注详细清晰,读者易于理解和掌握。

本书既适合初学者,也适合有一定电子技术基础的爱好者及专业技术人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

集成运算放大器应用电路集萃/卿太全编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 10

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0933 - 3

I. ①集… II. ①卿… III. ①集成电路 - 运算放大器 - 电路设计 IV. ①TN722. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 194207 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 3 月第一版 2011 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 322 千字
印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着运算放大器应用越来越广泛，掌握或了解运算放大器的基本原理及应用大有必要，对电子爱好者和专业技术人员来说，学习电子技术、计算机技术、传感器技术，运算放大器是必不可少的重要器件之一，在懂得了它们的基本原理后，就具备了一定的实际动手能力和设计能力。基于以上原因，本书介绍了运算放大器的基本原理与应用，为培养实际动手能力、开发能力提供了很好的参考和借鉴作用。

本书通俗易懂，知识面广，电路通用性、实用性强，注重理论与实践相结合。本书既适合初学者，也适合有一定电子技术基础的爱好者及专业技术人员。

由于编者水平有限，书中难免存在一些疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者
2011. 1

目 录

前言

第一章 运算放大器基础	1
第一节 集成运算放大器的符号和组成	1
第二节 运算放大器的分类	1
第三节 运算放大器的参数与名词术语	3
第四节 运算放大器的基本应用	6
第二章 运算放大器线性放大电路	27
第一节 运算放大器基本放大电路	27
第二节 运算放大器实用线性放大电路	31
第三章 集成运算放大器音频视频电路	41
第一节 音频电路	41
第二节 视频电路	53
第三节 其他音视频电路	58
第四章 检测电路	60
第一节 电阻电压电流监测电路	60
第二节 其他电路	67
第五章 传感器电路	75
第一节 温度传感器电路	75
第二节 声光传感器电路	84
第三节 红外线传感器电路	89
第四节 其他传感器电路	95
第六章 滤波与波形电路	103
第一节 滤波电路	103
第二节 波形发生电路	110

第七章 差分/仪器放大器	117
第一节 常用差分/仪器放大器电路原理	117
第二节 差分/仪器放大器应用电路	120
第三节 单片差分/仪器放大器	127
第四节 其他差分/仪器放大器	130
第八章 电源电路	135
第一节 参考（基准）电压源	135
第二节 参考（基准）电流源	138
第三节 稳压电源	142
第四节 其他电路	147
第九章 驱动与控制电路	153
第一节 灯光电路	153
第二节 电动机电路	157
第三节 开关电路	159
第四节 线路驱动电路	161
第五节 其他电路	163
第十章 其他电路	168
附录 本书集成电路型号索引	176
参考文献	206

第一章 运算放大器基础

运算放大器（简称运放）是高增益、高输入阻抗、低输出阻抗、高共模抑制比的多级直接耦合的直流放大器。运算放大器一般都采用集成电路设计制造，目前已经很少使用分立元件运算放大器了。因此，本书介绍集成运算放大器（除特别说明外，本书运算放大器均指集成运算放大器）的基本原理与应用电路。

利用集成运算放大器（简称集成运放）工作在线性区的特点及输入、输出电压之间的关系，外接不同的元件形成反馈网络就可以实现多种数学运算，可以灵活地实现各种特定的函数关系运算等。运算放大器输入信号电压与输出信号电压的一般关系式为 $U_o = f(U_i)$ ，可以模拟成数学运算关系 $y = f(x)$ ，这种运算又称为模拟运算。模拟运算在物理量的测量、自动控制系统、仪表测量系统等领域得到了较广泛的应用。在线性应用方面，运算放大器可组成比例运算、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

第一节 集成运算放大器的符号和组成

一、运算放大器的符号

运算放大器的符号如图 1-1 所示。

图 1-1 中，“+”、“-”端分别为运算放大器的同相输入端、反相输入端， U_o 为输出端，通常省略了电源端。

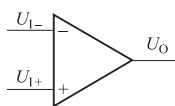


图 1-1 运算放大器的符号

二、运算放大器的组成

运算放大器主要由以下几部分组成：

- (1) 差动输入级（组合电路）。
- (2) 中间级（提供高增益）。
- (3) 输出级（互补输出）。
- (4) 附加电路，包括直流偏置、补偿、调零、电源电路等。

第二节 运算放大器的分类

运算放大器有多种分类方法。按性能参数，运算放大器可分为：

一、通用运算放大器

通用运算放大器是以通用为主要目的而设计的。主要特点是价格低廉、产品市场需求量大、性能指标满足一般应用。如 $\mu\text{A}741$ （单运放）、LM358（双运放）、LM324（四运放）及以场效应管（FET）为输入级的 LF356 等，它们是目前应用最为广泛的集成运算放大器之一。

二、高阻运算放大器（高输入阻抗运算放大器）

这类运算放大器的特点是差模输入阻抗非常高，输入偏置电流非常小。输入阻抗 R_{id} 一般为 $R_{id} > (10^9 \sim 10^{12}) \Omega$ ，输入偏置电流 I_B 为几皮安（pA）至几十皮安。这些运算放大器多采用场效应管（FET）组成差分输入级，利用场效应管高输入阻抗的特点，FET 不仅输入阻抗高，输入偏置电流小，而且具有高速、宽带和低噪声等优点，但输入失调电压较大。这类运放常见的型号有 LF356、LF355、LF347（四运放）及更高输入阻抗的 CA3130、CA3140 等。

三、高精度、低温漂运算放大器

在精密仪器、弱信号检测等自动控制、测量中，总是希望运算放大器的失调电压尽可能小且不随温度变化（温度稳定性好）。低温漂运算放大器就是为此而设计的，“低温漂”性能往往是与“高精度”相伴随的。常用的高精度、低温漂运算放大器有 OP07、OP27、AD508 及斩波稳零型低漂移运放 ICL7650 等。

四、高速运算放大器

在高速 A/D 和 D/A 变换器、视频放大电路中，要求运算放大器要有高的转换速率 S_R 、足够大的单位增益带宽 BWG ，这就是高速运算放大器。高速运算放大器的主要特点是：转换速率高、频率响应范围宽。常见的高速运放有 LM318、 $\mu\text{A}715$ 等，转换速率 $S_R = 50 \sim 70\text{V}/\mu\text{s}$ ，单位增益带宽 $BWG > 20\text{MHz}$ 。

五、低功耗（微功耗）运算放大器

在便携式仪器设备中，常使用低电源电压（电池）供电，因此，低功耗运算放大器是非常实用的。常用的低功耗运算放大器有 TL022C、TL060C 等，它们的工作电压为 $\pm (2 \sim 18)\text{V}$ ，消耗电流为 $50 \sim 250\mu\text{A}$ 。有的产品功耗已达微瓦级，例如 ICL7600 的供电电源仅为 1.5V ，功耗为 $10\mu\text{W}$ ，可方便地应用于单节电池供电的电路中。

六、高压大功率运算放大器（功率运算放大器）

运算放大器的输出电压主要受供电电源的限制。在一般的运算放大器中，输出电压的最大值一般仅几十伏，输出电流仅几十毫安。若要提高输出电压或增大输出电流，集成运放外部必须另加辅助电路。高压大电流集成运算放大器省去了外围附加电路，就可输出高电压和大电流。例如，运放 D41 的电源电压可达 $\pm 150\text{V}$ ， $\mu\text{A}791$ 的输出电流可达 1A ，OPA541 可输出 10A 的峰值电流。

另外,按每块芯片内集成运放单元电路数目的多少,集成运算放大器又可分为单运放(芯片内集成了1个运放单元电路,如 $\mu\text{A}741$)、双运放(芯片内集成了2个运放单元电路,如LM358)、四运放(芯片内集成了4个运放单元电路,如LM324)等。

近来又生产出了轨对轨(rail to rail)运算放大器。所谓轨对轨运算放大器,是指输入和输出电压摆幅非常接近或几乎等于电源电压值的放大器,可以允许输入电位在从负电源到正电源的整个区间变化,甚至稍微高于正电源或稍微低于负电源。轨对轨运算放大器主要应用于高精度、低功耗电路中,其作用是在没有交叉偏置电压失真的情况下获得全范围输入电压或得到全电源电压范围的宽电压范围输出。这类运算放大器有AD627/8751/8752/8754、TS925、OPA350、LTC6087/6088等。

第三节 运算放大器的参数与名词术语

一、理想运算放大器

1. 理想运算放大器的特点

- (1) 高增益,开环差模电压放大倍数 $A_U \rightarrow \infty$ 。
- (2) 差模输入阻抗 $R_{id} \rightarrow \infty$ 。
- (3) 恒压输出,输出阻抗 $R_o \rightarrow 0$ 。
- (4) 共模抑制比, $CMRR \rightarrow \infty$ 。
- (5) 零偏置输入,输入偏置电流 $I_{B1} = I_{B2} = 0$ 。
- (6) 失调电压、失调电流及温度漂移为零。
- (7) 频带宽, $BW = \infty$ 。

2. 理想运算放大器的分析方法

构成理想运算放大器的基本条件是:开环差模电压放大倍数 $A_U \rightarrow \infty$,差模输入电阻 $R_{id} \rightarrow \infty$,输出电阻 $R_o \rightarrow 0$,共模抑制比 $CMRR \rightarrow \infty$ 。因此,利用理想运放分析电路时,应根据理想运放以下所具有的特征使得电路分析得以简化:

- (1) 输入失调电压 U_{I0} 、温度随电源电压漂移量均为零。
- (2) 输入偏置电流 I_B 、失调电流 I_{I0} 及温漂随电源电压漂移量均为零。
- (3) 等效输入噪声电压、噪声电流均为零。
- (4) 输出电阻 $R_o = 0$ 。
- (5) 开环差模电压增益为无穷大。
- (6) 开环差模输入阻抗为无穷大。
- (7) 共模输入电阻及共模抑制比为无穷大。
- (8) (-3dB) 带宽为无限大。
- (9) 转换速率 S_R 为无限大。

基于以上特征,理想运算放大器的模型图可以等效为图1-2。

根据理想运算放大器的模型及其特征,可以得出:

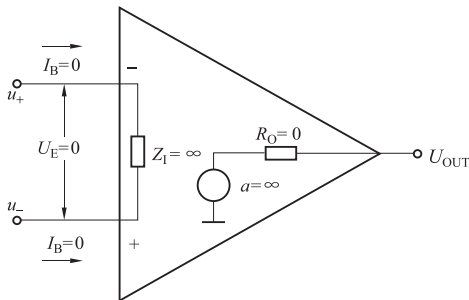


图 1-2 理想运算放大器模型

(1) 因 $I_B = 0$, 因此, $U_+ = U_- = 0$, 运放的反相输入端相当于“虚地” ($U_- = 0$), 它的共模输入电压可视为零, 因此对运放的共模抑制比要求较低。

(2) 由于深度电压负反馈输出电阻很小 ($R_o \approx 0$), 因此带负载能力较强。

图 1-3 为理想运算放大器和实际运算放大器的传输特性图。

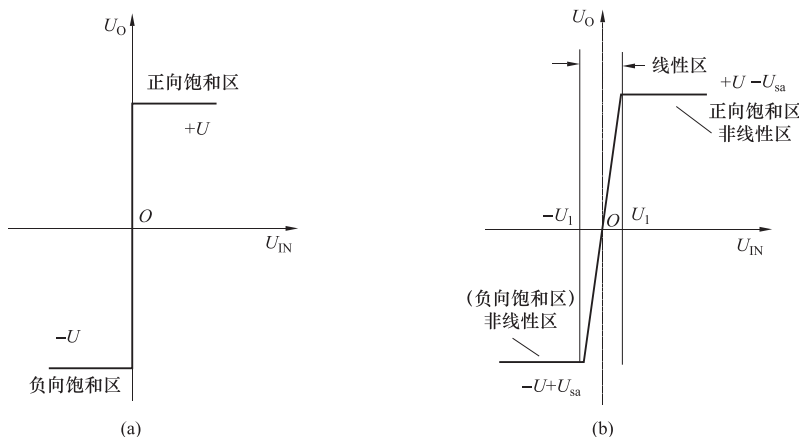


图 1-3 理想运算放大器和实际运算放大器的传输特性图

(a) 理想运算放大器的传输特性; (b) 实际运算放大器的传输特性

从图 1-3 (a) 可以看出, 对理想运算放大器来说, 输入电压 U_{IN} 只要大于零, 输出即达到正电源电压 $+U$; 输入电压 U_{IN} 小于零, 输出即达到负电源电压 $-U$ 。

从图 1-3 (b) 可以看出, 对实际运算放大器来说, 输入电压在 $-U_I \sim U_I$ 之间时, 运放工作于线性区, 该线性区之外即为饱和区 (U_{sa} 为运放输出管的饱和压降)。我们就是利用运放的线性区作放大应用的。

二、运算放大器的技术参数与要求

以上对理想运算放大器作了简要介绍, 而实际的运算放大器的参数不能达到理想运算放大器的指标, 下面主要介绍实际运算放大器的主要技术参数与要求。

1. 运算放大器的基本要求

- (1) 输入级要求: 零点漂移 (零漂) 尽量减小, 输入阻抗 R_{id} 尽可能大。
- (2) 中间级要求: 有足够大的电压放大倍数。
- (3) 输出级要求: 带负载能力强, 有足够的输出电流 I_o 及尽可能小的输出阻抗 R_o , R_o 一般为几欧至几十欧。

2. 运算放大器的基本参数

- (1) 开环差模电压放大倍数 A_d 。 A_d 是在开环状态、输出不接负载时的差模放大倍数, 一般在 $10^5 \sim 10^7$ 之间。理想运放的 A_d 为 ∞ 。
- (2) 共模抑制比 $CMMR$ 。常用分贝作单位, 一般在 100dB 以上。
- (3) 差模输入阻抗 R_{id} 。 $R_{id} > 1M\Omega$, 有的可达 100M Ω 以上。
- (4) 输出阻抗 R_o 。 R_o 为几欧至几十欧。
- (5) 最大共模输入电压 U_{Icmax} 。

(6) 最大差模输入电压 U_{Idmax} 。

3. 运算放大器的技术参数

(1) 输入失调电压 U_{I0} 。运放输出直流电压为零时，两个输入端之间所加的补偿电压称为输入失调电压 U_{I0} 。很显然 U_{I0} 数值越小越好，一般为几毫伏，高精度运放应在 1mV 以下。

(2) 输入失调电流 I_{I0} 。运放输出直流电压为零时，两个输入端偏置电流的差值定义为输入失调电流，或者说，输入失调电流是输入信号为零时，两个输入端的静态电流之差，即 $I_{I0} = |I_{B1} - I_{B2}|$ 。 I_{I0} 一般为纳安数量级，数值越小越好。

(3) 输入失调电压的温度系数 aV_{I0} 。一定温度范围内，失调电压的变化和温度变化的比值定义为 aV_{I0} ，习惯称为温度漂移。

(4) 输入偏置电流 I_B 。运放输出直流电压为零时（或输入信号为零时），两个输入端偏置电流的平均值定义为输入偏置电流。

(5) 差模开环电压增益 A_{Ud} 。在标称电源电压及规定负载下，运放工作在线性区时，输出电压变化与输入电压变化量之比定义为差模开环电压增益 A_{Ud} 。 A_{Ud} 一般在 60 ~ 180dB 之间。

(6) 共模抑制比 $CMMR$ 。 $CMMR$ 的单位为 dB，表达式为

$$K_{CMR} = 20 \lg \frac{U_{Ic}}{U_{Ic\varepsilon}} = 20 \lg \frac{A_{d-d}}{A_{c-d}} \quad (\text{dB})$$

(7) 电源电压抑制比 K_{SVR} 。运放工作于线性区时，输入失调电压随电源电压的变化率称为电源电压抑制比。

(8) 最大差模输入电压 U_{Idm} 。运放两输入端允许施加的最大电压差，若所施加的电压超过 U_{Idm} ，运放的输入级就有可能被反向击穿，甚至损坏。

(9) 最大共模输入电压 U_{Icm} 。在标称电源电压下，将运放接成电压跟随器，输出产生 1% 的跟随误差时的输入电压值；或定义为 $CMMR$ 下降 6dB 时所施加的共模输入电压值。

(10) 输出峰—峰电压 U_{p-p} 。在标称电源电压及指定负载下，运放输出的低频交流负电压峰值至正电压峰值，有时称为输出摆幅。

(11) 开环带宽 BW 。在正弦小信号激励下，运放开环电压增益值随频率从直流增益下降 3dB 所对应的信号频率定义为 BW 。

(12) 单位增益带宽 BWG 。运放在正弦小信号激励下及低频闭环增益为 1 时，闭环增益随频率从 1 下降到 0.707 所对应的频率定义为 BWG 。

(13) 转换速率 S_R （又称为压摆率）与全功率带宽 BWP 。在运放闭环电压增益为 1 时，输入正弦大信号，在指定负载和指定失真度等条件下，使运放输出电压幅度达到最大值时的信号频率，定义为 BWP ，简称为功率带宽。 BWP 受 S_R 的限制，它们之间的关系可近似表示为

$$BWP = \frac{S_R}{2\pi U_{om}}$$

式中 U_{om} ——输出电压幅度的最大值。

(14) 建立时间 t_{set} 。在闭环电压增益为 1 时，在阶跃大信号输入的条件下，运放输出电压达到某一特定数值范围时所需的时间。运放建立时间与输入输出的关系曲线如图 1-4

集成运算放大器应用电路集萃

Figure 1-1-1 consists of two graphs. The left graph shows the input voltage U_i versus time t . It is a step function that starts at t_1 and remains constant thereafter. The right graph shows the output voltage U_o versus time t . It shows the system's response to the step input. Key parameters labeled include: t_1 (start of input), t_2 (time when output reaches a certain level), t_3 (time when output reaches the settling time), t_4 (time when output reaches the final value), t_{set} (settling time), t_{dist} (disturbance time), t_{conv} (conversion rate), t_{err} (error range), and t_{final} (final voltage).

(15) 等效输入噪声电压和噪声电流。在屏蔽良好，无信号输入运放时，输出端出现的任何无规则的交流干扰电压波形称为运放的输出噪声电压，将它们换算到输入端时简称为等效输入噪声电压或等效输入噪声电流。

(16) 最大输出电压 U_{OPP} 。能使输出电压和输入电压保持不失真关系时的最大输出电压，称为运算放大器的最大输出电压。

(17) 开环电压放大倍数 A_{U0} 。指运放在无外部反馈的情况下的电压放大倍数，其数值越大越好。 A_{U0} 一般约为 $10^4 \sim 10^7$ ，即 $80 \sim 140\text{dB}$ 。

第四节 运算放大器的基本应用

由于运放的开环差模电压放大倍数很大 ($A_{Vd} \rightarrow \infty$)，而开环电压放大倍数受温度的影响大，且不稳定。因此实际应用中一般都要采用深度负反馈以提高其稳定性，另外运放的开环频带窄，例如 F007 只有 7Hz，无法适应交流信号的放大要求，加负反馈后可将频带扩展 $(1 + A_V f)$ 倍 (A_V 为电压放大倍数)。负反馈还可以改变输入、输出阻抗，改善运放性能等。所以要使运放工作在线性区，采用负反馈是必要的。

为了便于分析运放的应用电路，我们可以应用理想运算放大器的“虚短”与“虚断”两个主要概念来对实际运算放大器进行分析。

(1) 由于运放的差模开环输入电阻 $R_{\text{id}} \rightarrow \infty$ ，输入偏置电流 $I_{\text{B}} \approx 0$ ，即不向外部索取电流，因此两个输入端电流作为零处理。即 $I_{\text{i-}} = I_{\text{i+}} = 0$ ，这就是说，运放工作在线性区时，两个输入端均无电流，称为“虚断”。

(2) 由于两个输入端无电流, 则两输入端电位相同, 即 $U_- = U_+$ 。因此, 运放工作在线性区时, 两个输入端看作等电位, 称为“虚短”。

有了以上两个概念后，分析运算放大器构成的放大电路就简单化了。

一、比例运算

比例运算实际上是运算放大器最基本的放大电路，输出与输入信号之间的关系满足线性代数方程 $y = kx$ (k 为比例系数)。比例运算放大器基本的放大电路包括反相、同相放大电路，电路原理如图 1-5 所示。

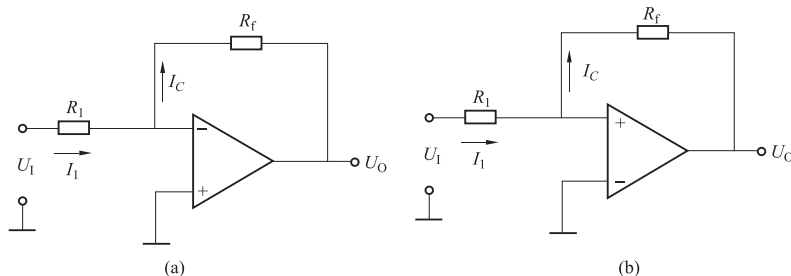


图 1-5 运算放大器比例运算电路

(a) 反相放大器电路；(b) 同相放大器电路

由于运放输入端的“虚断”、“虚短”关系，可以得到 $I_1 = I_c$ ，由此可以得出反相、同相放大器的输入 U_1 与输出电压 U_0 的关系式分别为 $U_0 = (-R_f/R_1)U_1$ 、 $U_0 = (1 + R_f/R_1)U_1$ ，因电阻 R_f/R_1 之比（令 $k = R_f/R_1$ ）是常数，因此上述两个电路的输出电压与输入电压之间的关系是比例关系，从而实现了比例运算。调节 R_f 和 R_1 的比值，就可以改变比例系数 k ，而改变放大量。若反相放大器的 $R_f = R_1$ ，比例系数 $k = -1$ 、则 $U_0 = -U_1$ ，就实现了 $y = -x$ 的符号求反运算。该电路又称为反相器。

二、加法、减法运算

加法、减法运算的代数方程式为 $y = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + \dots$ ，其电路模式为 $U_0 = k_1U_{11} + k_2U_{12} + k_3U_{13} + \dots$ ，加法、减法运算电路原理如图 1-6 所示。三个输入信号加在反相输入端，由于反相输入端有“虚地”关系，因此 $U_- = U_+ = 0$ 。

各支路电流分别为

$$I_1 = \frac{U_{11}}{R_1}, I_2 = \frac{U_{12}}{R_2}, I_3 = \frac{U_{13}}{R_3}, I_f = -\frac{U_{10}}{R_f}$$

由于虚断 $I_{1-} = 0$ ，则

$$I_f = I_1 + I_2 + I_3$$

$$-\frac{U_0}{R_f} = \frac{U_{11}}{R_1} + \frac{U_{12}}{R_2} + \frac{U_{13}}{R_3}$$

$$U_0 = -\left(\frac{R_f}{R_1}U_{11} + \frac{R_f}{R_2}U_{12} + \frac{R_f}{R_3}U_{13}\right)$$

$$y = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3$$

$$k_1 = -\frac{R_f}{R_1}, k_2 = -\frac{R_f}{R_2}, k_3 = -\frac{R_f}{R_3}$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ 时

$$U_0 = -\frac{R_f}{R}(U_{11} + U_{12} + U_{13})$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f = R$ 时， $U_0 = -(U_{11} + U_{12} + U_{13})$ ，该式中比例系数为 -1 ，因此， $R_1 = R_2 = R_3 = R_f = R$ 时实现加法运算。

为使两个输入端达到平衡，实际应用中图 1-6 所示的电路的同相输入一般不直接接地，

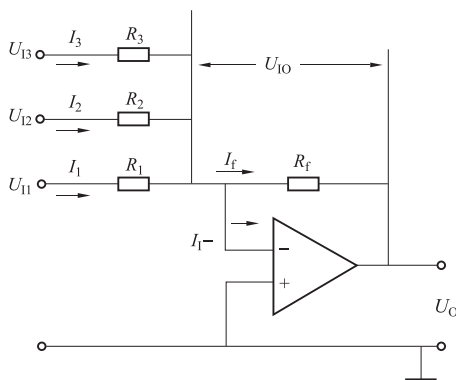


图 1-6 运算放大器加法、减法运算电路

而是通过电阻接地，电路原理如图 1-7 所示。

输入输出之间的关系为

$$U_O = -R_f \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right)$$

平衡电阻 R_4 的取值为 $R_4 = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$ ，即 R_4 等于所有输入端的电阻与反馈电阻的并联值。

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时，把其中的部分输入接同相输入端，另一部分输入接反相输入端，即按图 1-8 连接，则得到加法、减法混合放大电路。输出与输入的关系为

$$U_O = U_1 + U_2 - U_3 - U_4$$

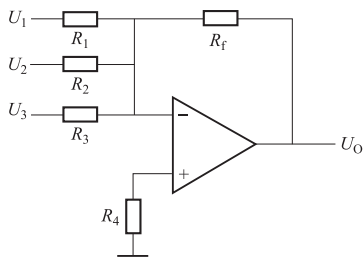


图 1-7 运算放大器加法、减法运算电路（改进型）

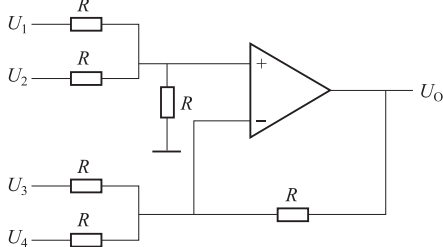


图 1-8 加法、减法混合放大电路

三、差分放大器

差分放大器在传感器的测量、测控电路中应用广泛，电路基本原理如图 1-9 所示。

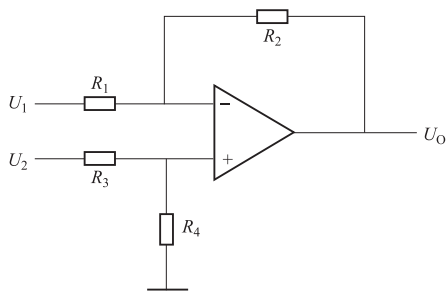


图 1-9 差分放大器电路基本原理

输入输出之间的关系为

$$U_O = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_4}{R_1} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1$$

实际应用中，一般取 $R_1 = R_3$ 、 $R_2 = R_4$ ，或 $R_1 // R_2 = R_3 // R_4$ ，则上式变为

$$U_O = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

该式表明：输出电压等于两个输入电压之差的 R_2/R_1 倍， R_2/R_1 一旦确定后就是常数了，输出电压变化只与输入电压的差有关。

四、积分运算

积分运算是模拟计算机中的基本单元电路，数学模式为 $y = k \int x dt$ ，电路模式为 $u_1 = k \int U_1 dt$ ，电路原理如图 1-10 所示。

在图 1-10 所示电路中，相当于是将反相放大器中的反馈电阻 R_f 换成电容 C ，就成了积分电路。电容 C 两端的电压 U_C 、输出电压 U_O 与输入电压 U_1 之间的关系满足以下关系

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_C dt, \quad U_O = -U_C, \quad I_1 = I_f = I_C = \frac{U_1}{R_1}$$

$$U_O = -\frac{1}{R_1 C} \int U_1 dt$$

由上式可以看出, 该电路可以实现积分运算。

五、微分运算

微分运算是积分运算的反运算。将积分运算电路中的电阻、电容互换位置就可以实现微分运算, 电路原理如图 1-11 所示。

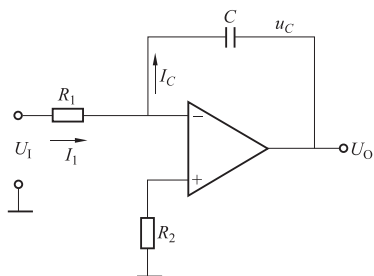


图 1-10 积分运算电路原理

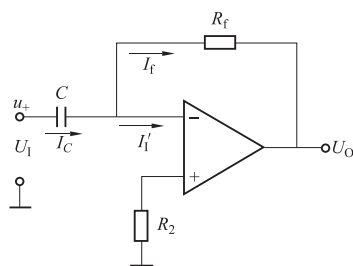


图 1-11 微分运算电路原理

由于 $U_+ = 0$, $I_1 = 0$, 则

$$I_C = I_f, \quad I_C = I_f = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_1}{dt}$$

$$U_O = -I_f R_f = -I_C R_f = -R_f C \frac{dU_1}{dt}$$

由上式可以看出, 输入信号 U_1 与输出信号 U_O 为微分关系, 即实现了微分运算。负号表示输出信号与输入信号反相, $R_f C$ 为微分时间常数, 数值越大, 微分作用越强。

六、对数和指数运算

1. 对数放大电路

如图 1-12 所示为二极管与运放构成的基本的对数放大电路。输出与输入之间的关系及推导如下

$$\begin{aligned} i_D &= i_1 = \frac{U_1}{R} \\ U_D &= -U_O \\ i_D &= I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \\ &\approx I_S e^{\frac{U_D}{U_T}} = I_S e^{-\frac{U_O}{U_T}} = \frac{U_1}{R} \\ U_D &\gg U_T \text{ 时} \\ U_O &\approx -U_T \ln \frac{U_1}{R I_S} \end{aligned}$$

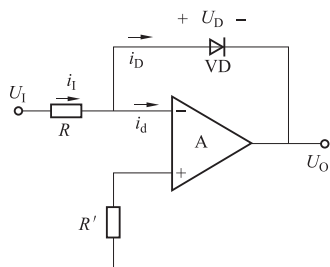


图 1-12 对数放大电路

式中: $U_T = KT/q$, 其中, $K = 1.381 \times 10^{-23}$, 为波尔兹曼 (Boltzman) 常数; T 为绝对温度;

$q = 1.602 \times 10^{-19}$, 为电荷常数。

2. 改进型对数放大电路

基本对数放大电路缺点是: 运算精度受温度影响大, 小信号时 e^{U_D/U_T} 与 1 差不多大, 所以误差大, 二极管在电流较大时伏安特性与 PN 结伏安特性差别较大, 所以只有在较小的电流范围内误差较小。

改进型对数放大电路中, 用三极管代替了二极管, 在理想情况下可完全消除温度的影响。改进型对数放大电路如图 1-13 ~ 图 1-16 所示。

图 1-13 中各量关系如下

$$\begin{aligned} i_C &\approx i_E \approx i_1 = \frac{U_1}{R} \\ i_E &= I_S \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \\ &\approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \quad (U_{BE} \gg U_T \text{ 时}) \\ -U_{BE} &\approx U_O = -U_T \ln \frac{i_C}{I_S} = -U_T \ln \frac{U_1}{RI_S} \end{aligned}$$

图 1-14 中各量关系如下

$$\begin{aligned} U_{O1} &\approx -U_T \ln \frac{U_{I1}}{RI_S} \\ U_O &= \frac{R_f}{R_1} (U_{O1} - U_{O2}) \\ &= \frac{R_f}{R_1} U_T \ln \frac{U_{I1}}{U_R} \\ U_{I1} &> 0 \quad U_R > 0 \\ U_{O2} &\approx -U_T \ln \frac{U_R}{RI_S} \end{aligned}$$

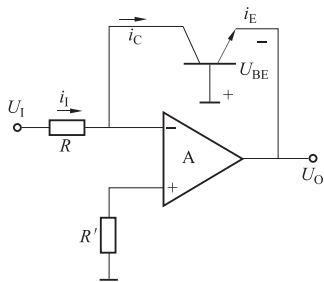


图 1-13 改进型对数放大电路 1

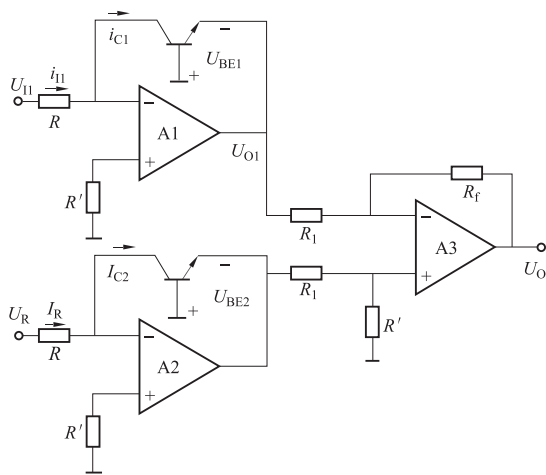


图 1-14 改进型对数放大电路 2

若忽略 VT2 基极电流, 则 M 点电位为

$$U_M = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_O = U_{BE2} - U_{BE1}$$

由于 $i_{C1} = i_{I1}$ $i_{C2} = I_R$

所以 $U_{BE1} = U_T \ln \frac{U_1}{R_1 I_S}$

$$U_{BE2} = U_T \ln \frac{U_R}{R_2 I_S}$$

$$U_O = -U_T \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \ln \left(\frac{R_2}{R_1 U_R} U_1 \right)$$

如果取 $R_2 = R_1$, 并令 $K = \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) U_T (\lg e)^{-1}$, 则

$$U_O = -K \lg \frac{U_1}{U_R}$$

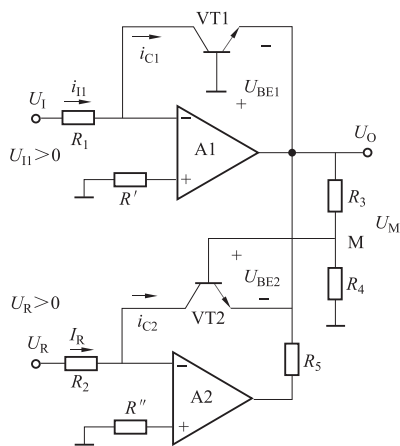


图 1-15 改进型对数放大电路 3

图 1-16 中各量关系如下

$$U_O = K \lg \frac{I_1}{I_2}$$

其中

$$K = 2.30 \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_T \lg \frac{I_1}{I_2}$$

$$(U_T = U_{BE1} = U_{BE2}, \text{ 假设 } U_{BE1} = U_{BE2})$$

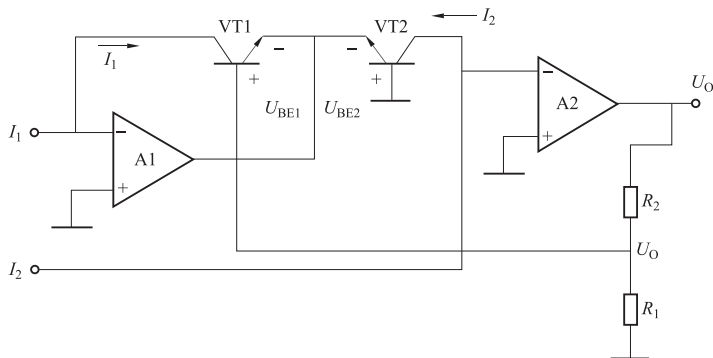


图 1-16 改进型对数放大电路 4

3. 基本指数电路

基本指数电路如图 1-17 所示。

$$U_O = -R I_s e^{\frac{U_1}{U_T}}$$

$$U_1 \gg U_T \text{ 时}$$

$$i_D \approx I_s e^{\frac{U_1}{U_T}} = i_R = -\frac{U_O}{R}$$

4. 反函数型指数电路

该电路必须为负反馈才能正常工作, 如图 1-18 所示, 则