
内 容 简 介

运算放大器广泛应用于模拟计算技术、测量技术和自动控制等多种领域中。

本书系统介绍了：晶体管运算放大器原理、应用和有关电路；稳定性问题；电路方案的选择；静态设计和调整；动态设计和调整以及指标测试方法等。

本书可供从事模拟计算技术、测量技术和自动控制的广大工人、工程技术人员和高等学校有关专业师生参考。

晶体管运算放大器设计原理

何 同 杰 编 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1974 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1974 年 1 月第一次印刷 印张：6 5/8 插页：2

印数：0001—58,450 字数：149,000

统一书号：15031·69

本社书号：222·15—8

定 价：0.56 元

前 言

运算放大器广泛应用于电子模拟计算装置、自动控制和测量技术等多种领域中。

《晶体管运算放大器设计原理》是笔者从事运算放大器研制工作的总结，是向实践学习向群众学习的总结，也是向理论学习总结。如果能把实践提到理论的高度，再用理论指导我们的实践，以便把工作做得更快更好些，正是写这个总结的愿望。然而，由于笔者思想政治水平和技术水平很差，深感难以达到目的，缺点错误也在所难免。如果本书能和读者见面，笔者高兴听到同志们的批评指导，以获抛砖引玉的效果。

清华大学吴企渊、史美林等同志曾对原稿提出有益的建议，笔者表示感谢。

笔者

一九七二年五月

目 录

第一章 运算放大器工作的一般原理	1
一、什么叫运算放大器	1
二、运算结果的稳定性	3
三、主要技术指标	3
四、所谓理想运算放大器	7
五、运算放大器的主要运算功能	8
六、运算放大器的其它应用举例	12
第二章 运算放大器的运算误差	17
一、加法器的静态误差	17
二、加法器的动态误差	21
三、反相器的阶跃响应	25
四、积分器的静态误差	26
五、积分器的动态误差	30
六、运算误差与电压体制	32
第三章 自动稳零放大器	35
一、参数补偿放大器	35
二、变换式直流放大器工作原理	37
三、调制电路	40
四、斩波器	43
五、交流放大器	52
六、解调电路	56
七、变换放大器有关参数的说明	57
八、自动稳零放大器	58

九、多通道放大器·····	61
第四章 晶体管直流放大级 ·····	63
一、晶体管的有关参数·····	63
二、对主直流放大器各级的基本要求·····	65
三、输入级常用电路简介·····	66
四、中间级常用电路简介·····	71
五、输出级常用电路说明·····	72
六、串联管与复合管·····	75
七、场效应晶体管放大级·····	77
第五章 运算放大器的稳定性问题 ·····	79
一、运算放大器传递函数的推导·····	79
二、开环幅频特性与闭环稳定性·····	82
三、典型环节的幅频特性与相频特性·····	84
四、开环对数幅频特性的绘制方法·····	88
五、开环幅频特性与动态品质·····	90
六、预期开环对数幅频特性的决定·····	91
七、校正电路时间常数的级间分配原则·····	93
八、晶体管放大级的固有传递函数·····	95
九、晶体管放大级的并联校正·····	99
十、晶体管放大级的串联校正·····	103
第六章 运算放大器的方案选择和具体电路确定 ·····	105
一、提出指标要求的根据·····	105
二、方案选择·····	111
三、具体电路的确定·····	115
四、电源电压确定·····	120
五、晶体管的选择·····	120
六、晶体管主要参数的再测试·····	123
第七章 运算放大器的静态设计和静态调整 ·····	125

一、主直流放大器的静态设计·····	125
二、变换放大器的静态设计·····	134
三、主直流放大器的静态调整·····	138
四、变换放大器的静态调整·····	144
五、静态闭环检查·····	147
第八章 运算放大器的动态设计和动态调整·····	149
一、静态试验结果·····	149
二、输入、输出阻抗和增益的计算·····	150
三、无源网络频率特性的绘制·····	155
四、主直流放大器预期频率特性的确定·····	160
五、积分器稳定性校验·····	162
六、主放大器预期频率特性的级间分配·····	164
七、各级校正电路形式确定与参数计算·····	166
八、分级动态调整·····	170
九、闭环总调·····	177
十、积分器稳定性检查·····	178
十一、稳定性的机上调整·····	180
第九章 运算放大器的指标测试·····	182
一、开环直流放大倍数的测试·····	182
二、开环频率特性测试·····	187
三、零点漂移测试·····	187
四、积分漂移测试·····	188
五、噪声测试·····	189
六、大幅度无失真平直频宽测试·····	189
七、闭环附加相移测试·····	190
八、最大线性输出范围测试·····	192
九、稳定储备测试·····	192
十、稳定储备检查·····	193

附录 参考电路.....	196
一般说明.....	196
参考电路一.....	197
参考电路二.....	200
参考电路三.....	200
参考电路四.....	203

第 一 章

运算放大器工作的一般原理

运算放大器是电子模拟计算机的核心部件，没有运算放大器就不成其为电子模拟计算机。因此，运算放大器被誉为电子模拟计算机的“心脏”。

但是，运算放大器的应用又绝非局限于电子模拟计算机中，在自动控制和测量技术等多种领域中也广泛的应用。

一、什么叫运算放大器

顾名思义，运算放大器就是做运算用的放大器。在电子模拟计算机中它的主要任务是对电信号进行各种线性数学运算，如求和、反号、积分等。

图 1-1 a 是一个高增益直流放大器。为了引入外部负反馈，它由奇数个反相放大级组成，即开环增益为负。

引入外部反馈网络之后(图 1-1 b)，若是忽略相加点的漏电流(即所谓栅流)，可列出下列方程

$$\frac{u_i - u_s}{Z_i} = \frac{u_s - u_o}{Z_f} \quad (1-1)$$

其中 $u_s = -u_o/G$ ，所以

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} \cdot \frac{G\beta}{1 + G\beta} \quad (1-2)$$

其中 $\beta = Z_i / (Z_i + Z_f)$ 。如果 $|G\beta| \gg 1$ ，则(1-2)式简化成

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (1-3)$$

从公式(1-3)看出,当满足上述假定后,对图 1-1 *b* 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 之比等于反馈阻抗 Z_f 与输入阻抗 Z_i 之比,而与高增益直流反相放大器无关。正因为这样,所以当改变输入和反馈阻抗(Z_i 和 Z_f)的形式时,图 1-1 *b* 所示电路就能对输入电压 u_i 进行各种数学运算。通常把图 1-1 *b* 所示的这个具有并联深度负反馈的高增益直流放大器称为运算放大器。

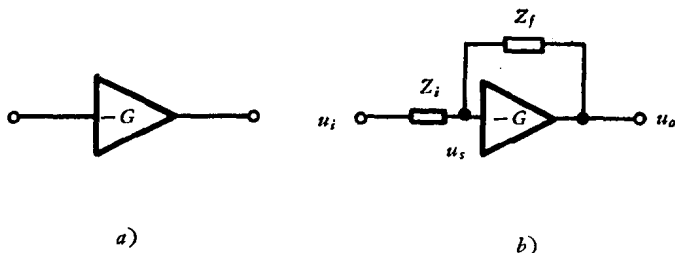


图 1-1

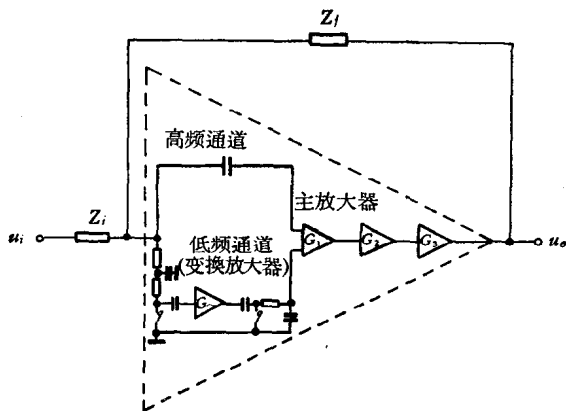


图 1-2

图1-2 是运算放大器的完整框图。被虚线三角形所包围的是一个高增益直流反相放大器。习惯上就把这个放大器以一个三角形表示,就像图 1-1 a 那样。

二、运算结果的稳定性

由于元件参数的变化,高增益直流放大器的增益 G 将随着发生变化。而增益 G 的变化又将影响运算结果。

为了说明这个问题,把公式(1-2)对增益 G 取微分

$$\begin{aligned} d\left(\frac{u_o}{u_i}\right) / \left(\frac{u_o}{u_i}\right) &= \frac{Z_i + Z_f}{Z_i + Z_f + GZ_i} \cdot \frac{dG}{G} \\ &= \frac{1}{1 + G\beta} \cdot \frac{dG}{G} \end{aligned} \quad (1-4)$$

可见,计算结果的相对变化比增益 G 的相对变化小 $(1 + G\beta)$ 倍。所以,只要高增益直流反相放大器的增益 G 足够大,计算结果就几乎不受增益 G 变化的影响。就是说计算结果是相当稳定的。

总括上述,由公式(1-3)和(1-4)决定的这样两个特点,使图 1-1 b 所示电路能够精确而稳定的进行数学运算。

三、主要技术指标

只有满足必要的精度,运算才有意义。为此目的提出如下指标,作为衡量运算放大器质量的基本依据。这些指标的定义是:

开环放大倍数

高增益直流放大器(图1-1 a)输入电压的微量变化 (Δu_i) 将引起输出电压的很大变化 (Δu_o) ,输出电压的变化量与其相

应的输入电压变化量之比,即 $\Delta u_o/\Delta u_i$ 叫做开环放大倍数,通常以字母 G 表示。

放大倍数以分贝($20 \lg G$)表示时,谓之增益。

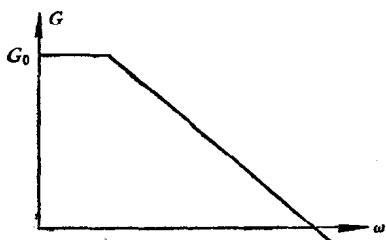


图 1-3

开环放大倍数是输入信号频率的函数,随着输入信号频率的增加,开环放大倍数跟着下降(图 1-3)。开环放大倍数对频率的依从关系称为开环频率特性。相应于直流信号的放大

倍数叫开环直流放大倍数。

开环频率特性是运算精度、闭环稳定性和动态品质的主要决定因素。合理设计开环频率特性,正确解决这些相互矛盾的因素正是设计运算放大器的主要任务。

零点偏移与零点漂移

从公式(1-3)看出,对于一个理想的运算放大器,当输入电压等于零时(比如将输入端接地),输出电压也应该是零。然而,就是设计十分完善的运算放大器也很难达到这一点,输出总要有一点偏移。这个恒定的输出偏移,可通过内部调零去掉。就是在高增益直流放大器输入端加一个等效误差电压,迫使运算放大器的输出回零。我们把加在直流放大器输入端的这个等效误差电压叫做运算放大器的零点偏移。

零点偏移的随机分量叫零点漂移。促成零点漂移的主要原因是电源电压波动、热效应、光效应以及元件老化等。由于零点偏移可以调掉,因此一般只考虑零点漂移。

因为零点漂移是极低频的随机量,我们只计其偏离零位的最大值。和零点偏移一样,它也是以归化到直流放大器输

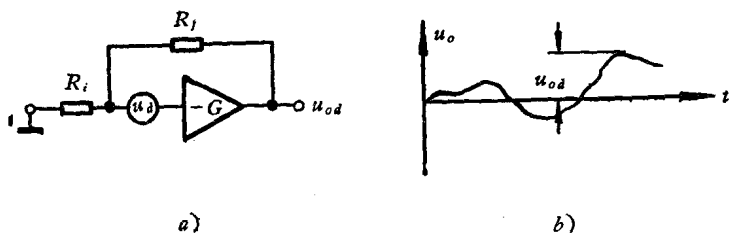


图 1-4

入端的误差电压(u_d)表示的。归化方法如图1-4。

$$u_d = u_{od} / (1 + R_f / R_i) \quad (1-5)$$

漏电流与积分漂移

漏电流,即通常所谓的栅流。实际上,就是高增益直流放大器输入端的漏电流,习惯上用 I_g 表示。

积分漂移系指零(积分器输入端接地)积分时,输出电压随时间的“爬行”。促成这一结果的因素有漏电流,零点偏移和零点漂移。通常于积分操作之前都将零点偏移调掉了,而零点漂移又是随机量。所以,产生积分漂移的主要因素就是漏电流。正因为这样,漏电流和积分漂移这两个指标一般只提其中一个就行了。

噪声

运算放大器输入端接地时(图1-4 a),在输出端可以测出散乱交流电压,我们称之为噪声。它的产生主要是由元件固有噪声、热噪声、电源噪声以及斩波器尖峰等引起。

噪声的大小,习惯上是用 1:1 状态(即 $R_i = R_f$)在运算放大器输出端量得的交流电压表示。根据要求不同,有的用有效值表示,有的用峰峰值表示。

闭环附加相移

在理想情况下,运算放大器的输出电压($\dot{u}_o$)与输入电压

($\dot{u}_i$) 是反相的。即有 180° 的相位差。但是, 由于高增益直流放大器带宽有限及无源网络寄生参数的影响, 实际输出电压与输入电压之间, 除原有 180° 相移之外, 还将产生一个很小的相移, 就像图 1-5 那样。我们把这个小的相移 φ 称为闭环附加相移, 简称附加相移。

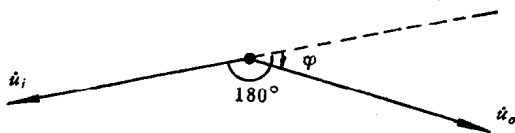


图 1-5

闭环频带

闭环频带系指 1:1 状态下, 运算放大器的大幅度无失真平直频宽。

闭环频带的宽窄取决于开环频率特性、校正环节时间常数在各级的分配方式以及静态工作点的设计等因素。

输出电压的最大变化率

输出电压的最大变化率系指输出电压相对于时间的最大可能变化率, 即 $(du_o/dt)_{\max}$ 。由于放大级给不出足够大的电流去驱动由电容和电阻构成的下一级负载, 使得输出电压的最大变化率 $(du_o/dt)_{\max}$ 受到限制。所以, 欲提高最大变化率就要加大各级输出电流的能力。同时给出电流的能力应该是从输入级到输出级递增的。输出电压的最大变化率是一个最有代表性的动态指标。

最大输出电压和电流

输出电压与输入电压保持线性关系的最大输出电压, 谓之运算放大器的最大输出电压。这时能给出的最大输出电流, 谓之运算放大器的最大输出电流。

常用的有两种电压体制: 10 V 和 100 V。实际最大输出

电压要比相应电压体制略高一点，以保证可靠工作。

输入阻抗

开环输入阻抗：从运算放大器相加点看进去的阻抗，也就是高增益直流放大器的输入阻抗。设计指标提到的输入阻抗均指这个阻抗。

闭环输入阻抗：由于运算放大器相加点基本上是地电位，所以从运算放大器输入端看进去的输入阻抗就是相应的运算电阻。

输出阻抗

开环输出阻抗：反馈断开时，从输出端看进去的阻抗，即高增益直流放大器输出级的输出阻抗。

闭环输出阻抗：有反馈时，从运算放大器输出端看进去的阻抗。

假定开环输出阻抗等于 Z_o ，则闭环输出阻抗等于

$$Z_o / (1 + G\beta) \approx Z_o / G\beta \quad (1-6)$$

可见，运算放大器的输出阻抗是相当小的。所以编排题目时部件间的联接是方便的。

以上介绍了运算放大器的主要指标，实际上就是提出设计要求。设计者的任务就在于从这矛盾的诸因素中抓住主要矛盾，在电路设计中合理地体现这些要求。

四、所谓理想运算放大器

具备下列条件的运算放大器，叫理想运算放大器：

开环放大倍数无限大；

开环频带无限宽；

零点漂移(偏移)等于零；

漏电流等于零；

没有噪声;

开环输入阻抗等于无限大, 开环输出阻抗等于零;

输出电压最大变化率为无限大。

实际上, 绝对理想的东西是不存在的。但在具体应用的情况下, 于一定运算精度范围内, 这种人为的相对理想化又是可行的。这对简化问题的分析是很有意义的。

五、运算放大器的主要运算功能

这节要介绍的是: 作为电子模拟计算机的核心部件——运算放大器所能完成的主要运算功能。

为简化问题的分析, 而又无损于所得的结论, 在讨论运算功能时, 认为运算放大器是理想的。

加法运算

加法运算的基本原理是电流求和。图 1-6 是实现这一运算功能的具体电路。

按图 1-6 所示电路, 相加点电流方程为

$$i_1 + i_2 + \cdots + i_n = i_f$$

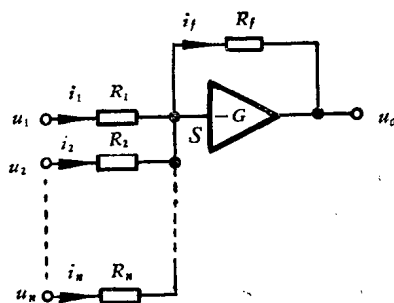


图 1-6

或

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \cdots + \frac{u_n}{R_n} = -\frac{u_o}{R_f} \quad (1-7)$$

经整理后得出

$$u_o = -R_f \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \cdots + \frac{u_n}{R_n} \right) = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i} \quad (1-8)$$

若 $R_1 = R_2 = \cdots = R_n = R_f$, 则输出电压直接等于各输入电压之和

$$u_o = -(u_1 + u_2 + \cdots + u_n) \quad (1-9)$$

反相运算

所谓反相运算,就是把输入量乘以 -1 ,即反个相位。

基于公式(1-8)的结论,对图 1-7 所示的反相器,得出

$$u_o = -\frac{R_f}{R_i} u_i = m u_i \quad (1-10)$$

其中 $m = R_f/R_i$ ——比例系数。如果 $R_i = R_f$, 则 $m = -1$ 而 $u_o = -u_i$, 即实现了乘以 -1 的反相运算。

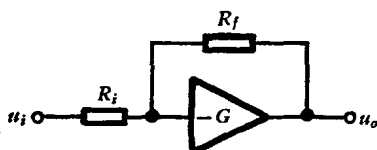


图 1-7

积分运算

图 1-8 给出的是通用积分电路。其中输入阻抗是纯电阻,即 $Z_i = R$, 而反馈阻抗是一个纯电容,即 $Z_f = 1/pC$ 。

根据公式(1-3)列出

$$\frac{u_o}{u_i} = -\frac{1}{pRC} \quad (1-11)$$

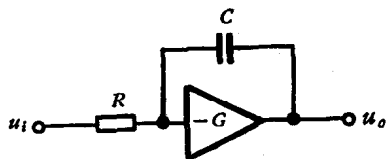


图 1-8

将(1-11)式转换成原函数,得出

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_o(0) \quad (1-12)$$

这便实现了对输入信号的积分运算。其中 $u_o(0) = u_o|_{t=0}$, 即输出电压的初始值,在数学上就是边界条件。

其实,(1-12)式给出的运算结果,也不难从输入电流 $i = u_i/R$ 对积分电容的充电中得出。

按惯性环节加初始值的电路如图 1-9 所示。加初始值时,触点 A 断开, B 接通,于是放大器输出电压按指数规律上升到 $u_o(0)$ 。在积分时先断开触点 B , 待触点 A 接通时,便立即对输入信号积分,整个过程满足(1-12)式。

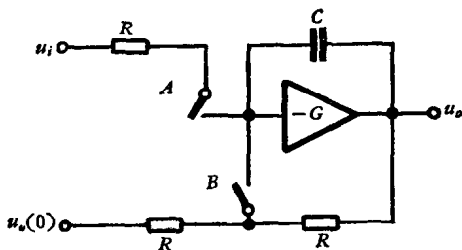


图 1-9

图 1-9 给出的加初始值的电路,其缺点是速度慢,改进的办法是采用瞬时加初始条件的电路,由电子开关进行控制。

微分运算

从数学上讲,微分是积分的反运算。所以,只要把图1-8所示积分电路中的 R 和 C 互换(图 1-10)便可做微分运算。然而,实际上这是行不通的,因为图 1-10 这个理想微分电路有如下两个致命的缺点:由于相加点接大电容,使电路本身倾向于自激;高频传递系数趋于无穷大,从而放大干扰。解决的办法是:在电容 C 上串个小电阻 R_1 , 于是传递函数变