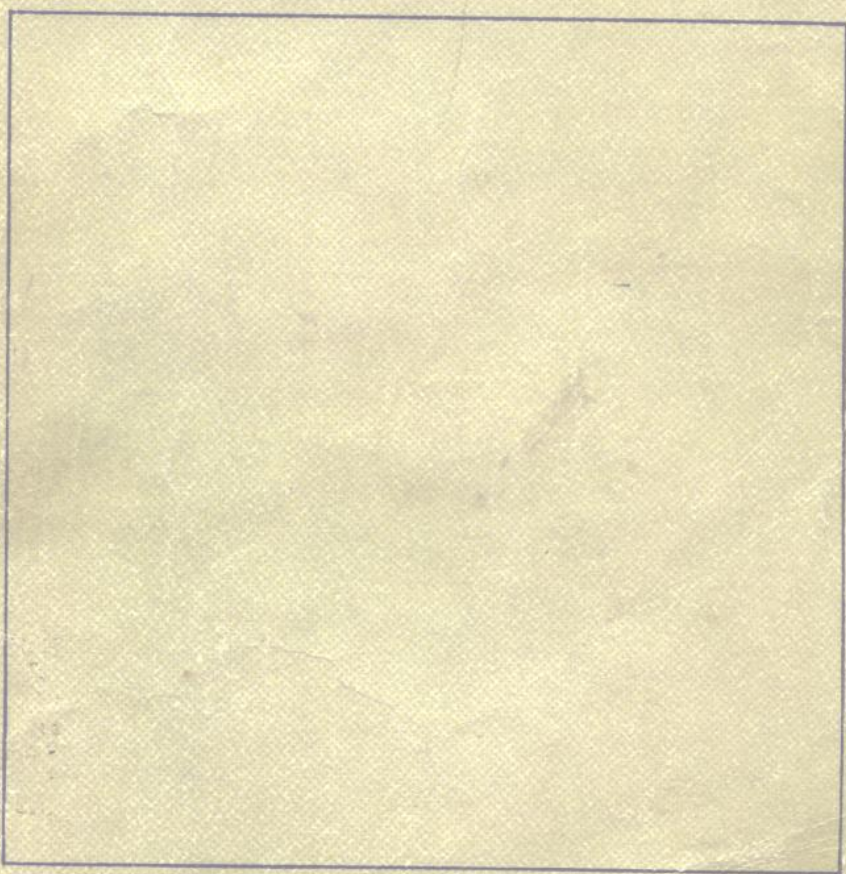

运算放大器电路

设计手册

[美] 戴维德 F·斯图特著



人民邮电出版社

运 算 放 大 器 电 路 设 计 手 册

【美】戴维德 F. 斯图特著

张保栋 周鑫之 译

陈 崇 连 校

人 民 邮 电 出 版 社

DAVID F. STOUT
Handbook of Operational
Amplifier Circuit Design
McGRAW-HILL BOOK COMPANY 1976

内 容 提 要

本书扼要介绍了运算放大器的设计原则、反馈稳定性和误差分析等问题,利用该电路易于系列化的特点,系统地介绍了68种电路的设计方法、电路参数和设计公式。读者可据此迅速建立电路模型。本书对科研人员、技术人员及大专院校师生都有一定的实用价值,是一部较为全面的运算放大器电路的设计工具书。

运算放大器电路设计手册

[美] 戴维德 F. 斯图特著

张保栋 周鑫之 译

陈 崇 连 校

责任编辑:俞天林

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

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8月第一版
印张: 18 页数: 288 1983年8月北京第一次印刷
字数: 473 千字 印数: 1—15,500 册
统一书号: 15045·总2703-无6222

定价: 2.65 元

译 者 序

目前，集成电路运算放大器已成为模拟计算技术，测量技术和自动控制等多种领域中不可缺少的电子器件。这种高增益直接耦合放大器利用反馈控制其响应特性，因而可以针对不同的应用，通过反馈网络的设计以产生各种转移函数。虽然它的主要功能是对电信号进行数学运算，如求和、反号、微分、积分等，但对于那些具有特殊变换要求和响应要求的电路，也有极为广泛的应用。例如，它既能提供音频放大器所需要的宽阔平直的增益——频率响应特性，也能提供各种整形放大器所要求的建峰响应特性。因此，如何合理地挑选和使用集成电路运算放大器，怎样简便地设计反馈网络，以便实现预期的电路功能，就成了每个电路设计人员经常碰到的实际问题。

本设计手册简明扼要地阐述了这类电路的设计原则、反馈稳定性和误差分析等问题；它利用这类电路易于系列化的特点，系统地介绍了 68 种电路的设计方法，并且列出了全部电路参数和设计公式。读者可据此迅速建立具体的电路模型。因此，本手册对科研工作者，工程技术人员及有关专业的大专院校师生都有一定的实用价值，是一部较为完整的运算放大器电路设计工具书。

本手册的第一、二、三章叙述了设计运算放大器电路所必需的基础知识，第四章到第二十七章按功能介绍了 24 种类型电路的工作原理和设计实例。这些章节之间有一定的独立性，读者可以根据自己的不同设计要求，通过目录和索引在本手册内查到有关的技术资料。对于缺乏运算放大器基础知识的读者，可首先学习前三章，然后参阅所需的有关章节。

我国读者在使用本手册时要注意具体电路中运算放大器组件的

选用条件。为了便于采用国产元件进行设计，我们收集了国内外部分运算放大器的型号对照表，附于手册之后以供参考。至于手册和对照表中未列出型号的器件，不妨根据前三章提出的指导性意见以及具体实例中的器件参数进行选用。

为便于查阅，本书后面所附索引中的各词条按汉语拼音顺序排列；拼音相同时，按四声顺序排列。以英文字母开头的各个词条排在最后面。

本书最后曾由北京邮电学院谢沅清同志审阅定稿，在此谨表谢意。

译者

1980.1.

序 言

运算放大器已经成为当前用得最普遍的电子器件之一。这种器件功能繁多、使用方便、应用广泛。本手册利用运算放大器设计易于系列化的特点,清晰而有步骤地给工程师、技术员和科学家提供一些省时省工地设计或分析由运算放大器组成的电路的方法,使他们不必再花费大量时间查阅现有参考资料去了解哪些公式适用于某一特定电路。

为了帮助设计人员迅速确定哪些公式适合于他们的具体要求,本手册以快速参考表格的形式给出了全部这样的公式。这种简化形式使本手册便于技术员以及工程师和科学家使用。

“运算放大器电路设计手册”提供了简明而容易掌握的方法,以及节省劳力的设计辅助资料。具体内容如下:

1. 为初学者而写的有关运算放大器的基本介绍(第一章)。
2. 设计运算放大器电路所需的两条基本定则(第二章)。
3. 综合列举出运算放大器的误差源以及减小误差的方法(第二章)。
4. 设计具有任何所需频率响应的放大器的方法(第二章)。
5. 详细叙述常用频率补偿电路及其对环路增益、相位余量和增益余量的影响(第三章)。
6. 列举运算放大器不稳定的七个主要原因及其补救方法(第三章)。
7. 68种运算放大器电路的设计资料(第四章到第二十七章)。对每一种电路都列出了设计公式一览表,并说明每个公式的确切含义和适用性。
8. 每一组设计公式都附有参数表,该表细致地说明每一种参数

或元件及其对电路性能的影响。

9. 在每一个设计章节中(第四章到第二十七章),都举出一个或两个电路的综合设计方法;每种设计方法都示出一组示范性设计步骤,可用来迅速构成该电路的工作模型。

10. 对于给出设计方法的每一种电路,都举出了详细的数字实例。这些例子清楚地说明设计步骤是如何实现的。

11. 六个附录的内容包括:运算放大器参数表,最大额定值,电路制造技术,手册中使用的符号,比值和分贝换算法, RC 转移函数综合图表。

戴维德 F. 斯图特
米尔顿 考夫曼

目 录

序言	1
第一章 运算放大器引言	1
1.1 运算放大器概述	1
运算放大器模型	3
理想运算放大器的参数	4
1.2 运算放大器的应用	5
线性放大器	5
非线性放大器	6
比较器	6
滤波器	6
对数应用	7
多谐振荡器	7
振荡器-发生器	8
稳压器及稳流器	8
采样电路	9
1.3 实际的运算放大器	9
运算放大器的封装	9
实际运算放大器的参数	10
电压增益	10
带宽	11
摆动速率	13
输入电阻	13
输入偏置电流	13
输入失调电流	13
输入失调电压	13
1.4 运算放大器同晶体管的比较	14
增益	14

频率响应	14
输入阻抗	14
输出电阻	15
1.5 基本运算放大器电路	15
基本反相运算放大器电路	15
基本同相运算放大器电路	16
1.6 实际运算放大器与理想运算放大器的比较	17
开环增益为有限值	17
带宽为有限值	19
输入电阻为有限值	19
输出电阻 > 0	21
1.7 反馈方程	21
1.8 运算放大器的大信号特性	24
1.9 运算放大器的开环特性	26
用分贝计算	26
运算放大器开环相移	27
零点的增益和相位	27
波德近似	28
1.10 运算放大器的闭环特性	29
1.11 环路增益和相位	30
1.12 运算放大器内部的电路	32
输入差动放大器	33
第二级差动放大器	33
电平移动放大器	33
输出功率放大器	34
第二章 运算放大器电路设计基础	36
2.1 简化设计的基本定则	36
反相放大器	36
同相放大器	37
2.2 如何减小运算放大器误差	38
输入失调电压 V_{I_0}	38

输入偏置电流 I_b	40
输入失调电流 I_{io}	43
等效输入噪声 V_n 和 I_n	45
输入电阻 R_{id} 和 R_{ic}	50
输入电容 C_{id} 和 C_{ic}	50
输出电阻 R_o	50
开环增益 A_v 和开环直流增益 A_{vo}	52
带宽 f_u 、 f_{cp} 、 f_r	54
摆动速率 S	56
共模抑制比(CMRR)	58
电源抑制比(PSRR)	61
2.3 计算 A_{vc} 的一般方法	62
Y 参数	63
用 Y 参数来计算 A_{vc}	65
第三章 反馈稳定性	68
3.1 反馈理论概述	68
正反馈和负反馈的效果	69
一次近似稳定性分析	71
环路增益方程的建立	77
增益余量和相位余量	80
3.2 补偿电路	81
滞后补偿	81
超前补偿	84
超前-滞后补偿	86
3.3 运算放大器不稳定的七个主要原因	92
第一——未采用参数表所推荐的补偿	93
第二——对于所用的补偿型式(和补偿量), 闭环增益太低	93
第三——运算放大器负载的容性成分过大	96
第四——反馈网络中的超前/滞后相位不适当	99
第五——运算放大器正输入端和地之间的电阻过大	101
第六——运算放大器输出端和平衡端之间的寄生电容过大	102

第七——电源旁路不良	103
3.4 反馈稳定性设计实例	103
第一例——增益为 10 的反相放大器	103
第二例——宽频带放大器	109
3.5 反馈稳定性的测量	114
环路增益测试法	114
闭环交流测试法	115
瞬态响应测试法	118
第四章 放大器	119
4.1 基本反相放大器	119
4.2 基本同相放大器	131
4.3 电流放大器	133
4.4 转移电阻放大器	136
4.5 转移电导放大器	138
4.6 交流耦合反相放大器	140
4.7 电荷敏感放大器	141
4.8 求和放大器	143
第五章 比较器	146
5.1 检零器	147
5.2 具有滞后特性的检零器	151
5.3 电平检测器	155
5.4 具有滞后特性的电平检测器	159
第六章 转换器	170
6.1 双斜式模/数转换器	170
6.2 数/模转换器	179
第七章 解调器和鉴别器	184
7.1 同步调幅解调器	184
7.2 调频解调器	188
7.3 脉宽鉴别器	193
第八章 检测器	206
8.1 正峰值检测器	206

8.2 检相器	209
第九章 差动放大器	220
9.1 基本差动放大器	220
9.2 仪用放大器	230
第十章 低通滤波器	234
10.1 二阶低通滤波器	234
10.2 三阶低通滤波器	242
第十一章 高通滤波器	249
11.1 二阶高通滤波器	249
11.2 三阶高通滤波器	257
第十二章 带通滤波器	262
12.1 多反馈带通滤波器	262
12.2 可变状态带通滤波器	270
第十三章 带阻滤波器	278
13.1 有源电感带阻滤波器	278
13.2 双T带阻滤波器	282
第十四章 频率控制	288
14.1 倍频器	288
14.2 频率差检测器	294
第十五章 积分器和微分器	302
15.1 微分器	302
15.2 积分器	310
第十六章 限幅器和整流器	315
16.1 限幅器	315
16.2 精密半波整流器	319
第十七章 对数电路	331
17.1 差动对数放大器	331
17.2 反对数放大器	340
第十八章 调制器	346
18.1 幅度调制	346
18.2 脉冲幅度调制器	355

18.3 脉冲宽度调制器	358
第十九章 乘法器和除法器	365
19.1 场效应晶体管控制的乘法器	365
19.2 对数-反对数乘法器/除法器	372
第二十章 多谐振荡器	380
20.1 自激多谐振荡器	380
20.2 双稳态多谐振荡器	383
20.3 单稳态多谐振荡器	387
第二十一章 振荡器	397
21.1 维氏电桥正弦波振荡器	397
21.2 电压控制振荡器	403
第二十二章 参数增大与模拟	410
22.1 电容倍增器	410
22.2 电感模拟器	413
第二十三章 功率电路	420
23.1 运算放大器带宽/功率增强器	420
23.2 运算放大器输出电压增强器	427
第二十四章 稳压与稳流	433
24.1 限流式稳压器	433
24.2 高压稳压器	444
24.3 分流式稳压器	447
24.4 精密基准电压	448
24.5 稳压器对	450
24.6 开关稳压器	452
24.7 浮动负载稳流器	455
24.8 接地负载稳流器	457
第二十五章 采样电路	461
25.1 场效应晶体管多路传输器	461
25.2 精密选通多路传输器	465
25.3 采样和保持电路	468
第二十六章 定时和移相电路	475

26.1 相位超前/滞后电路	475
26.2 可调超前/滞后电路	478
26.3 模拟定时器	480
第二十七章 波形发生器	485
27.1 斜坡电压发生器	485
27.2 三角形电压波发生器	489
27.3 阶梯形电压波发生器	494
附录 I 运算放大器的参数	499
附录 II 运算放大器最大额定值	501
附录 III 电路装配技术	502
III.1 保护电路	502
输入端	502
输出端	503
电源端	504
III.2 预防噪声技术	505
接地/旁路问题	505
屏蔽/隔离	506
III.3 运算放大器电路中的无源元件	509
电阻器	509
电容器	509
附录 IV 手册中使用的符号	511
附录 V 分贝的计算	517
附录 VI RC 电路的特性	520
国内外部分运算放大器型号对照表	544
索引	546

1

运算放大器引言

1.1 运算放大器概述

运算放大器是用反馈控制其特性的直接耦合高增益放大器，内部由几个晶体管放大器串联组成，外部可由图 1.1 所示符号表示。由于运算放大器具有接近于理想的特性，因而被模拟电路设计者广泛地采用。

运算放大器能够在从直流到几兆赫的频率范围内放大、控制、或产生任一种正弦波或非正弦波；能够进行加、减、乘、除、积分、微分等所有经典运算。在控制系统、调整系统、信号处理、测试仪表和模拟计算等非数值应用中都是很有用的。

如图 1.1 所示，从功能上看，运算放大器有一个受两个输入端控制的输出端。如果正极性电压加至正输入端(+)，运算放大器的输出为正。而当正极性电压加至负输入端(-)时，将使其输出为负。运算放大器的简化模型如图 1.2 所示，它表明，一个运算放大

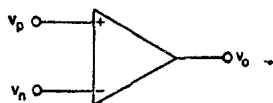


图 1.1 标准运算放大器符号

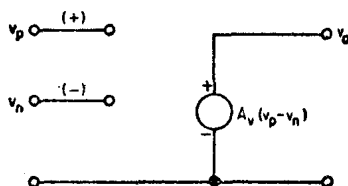


图 1.2 运算放大器的另一种表示法

器可用受两个“浮动”输入端控制的电压源表示。运算放大器对作用在两个输入端之间的差值信号具有很高的电压增益，而对同时加到两输入端的所谓共模输入信号，则增益甚低。

两个输入端标记为正、负或同相、反相。正输入端与输出同相，而负输入端则与输出反相。如果我们象图 1.3 那样，在放大器上连接两个电阻，便得到基本的同相放大电路。从 v_i 到 v_o 的电路增益仅取决于电阻 R_f 和 R_1 。如果将 R_f 短路，并去掉 R_1 ，便成为大家很熟悉的电压跟随器，其增益恰好等于 1。基本反相放大器如图 1.4 所示，同样，其增益也仅取决于 R_f 和 R_1 。

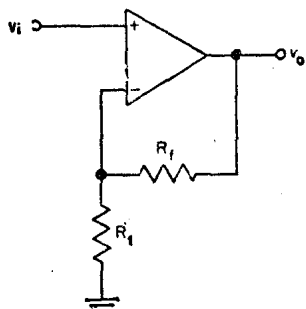


图 1.3 同相放大器

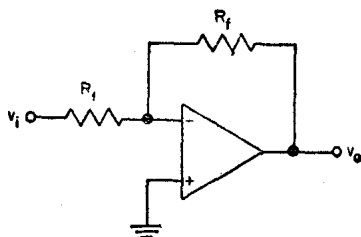


图 1.4 反相放大器

运算放大器两个输入端可同时使用而得到图 1.5 所示的差动放大电路，输出电压与加到两输入端的电压差值成比例，比例常数仅与电阻 R_f 和 R_1 的大小有关。

运算放大器在模拟数学运算时极为有用，图 1.6 是求几个输入

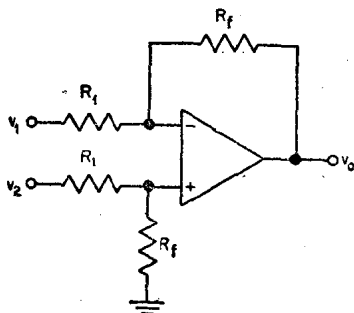


图 1.5 差动放大器

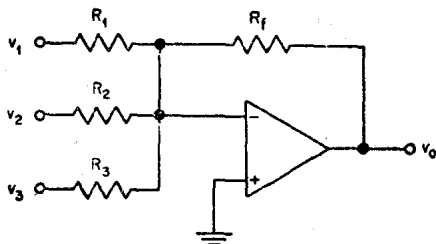


图 1.6 求和电路

之和的电路。图 1.7 的输出电压与输入电压的积分成比例(这就是一

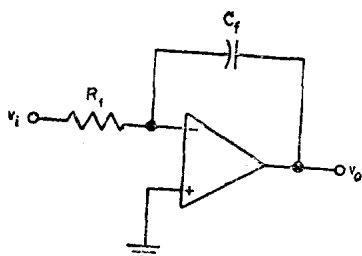


图 1.7 积分器

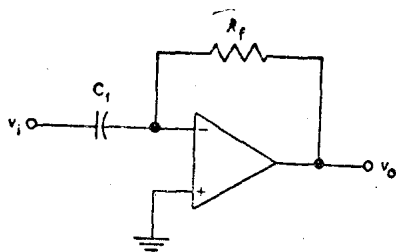


图 1.8 微分器

个积分器)，而图 1.8 的输出电压则与输入电压的微分成比例(这就是一个微分器)。

运算放大器可用来把一种电压转换为另一种电压(图 1.3 和 1.4)；把电压转换为电流(图 1.9)；把电流转换为电压(图 1.10)；

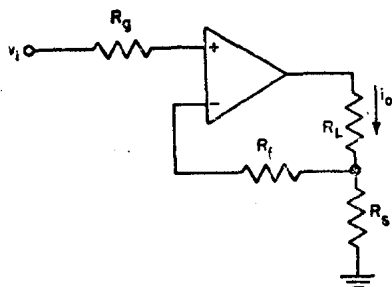


图 1.9 电压-电流转换器

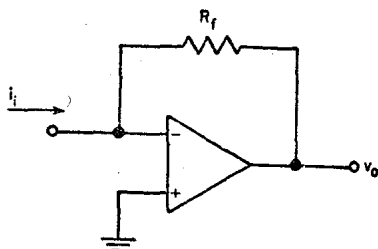


图 1.10 电流-电压转换器

把电流转换为另一种电流(图 1.11)。

这一章主要是供对运算放大器不太熟悉的读者阅读的，所涉及的内容包括：理想运算放大器和实际运算放大器的比较；运算放大器的应用；基本电路的计算；增益/相位相对于频率的关系曲线。

运算放大器模型 图 1.1 所示的运算放大器模型是简化示意图的标准符号，更详细的示意图在运算放大器上示出了多个端子，如图 1.12 所示。有些运算放大器需要用到其余的大部分的端子，而有些则只需要附加两个电源端子就行了。