

运算放大器 应用电路设计

(日) 马场清太郎 著
何希才 译



科学出版社

www.sciencep.com

图字: 01-2006-3702 号

内 容 简 介

本书分为三篇:第1篇介绍运算放大器的基础知识,主要包括运算放大器基本概念、特性参数和基本工作原理;第2篇阐述运算放大器的使用技术,内容包括运算放大器的动态范围、负反馈的使用、降低输出失调电压与噪声的方法,以及防振措施等;第3篇介绍运算放大器实用电路的设计,主要包括差动放大电路的设计、恒流电路基准电压电路、电压-电流转换电路、加减运算电路和比较器电路、有源滤波器和振荡器等电路的设计。

本书内容丰富、实用性强,既可供电子技术人员以及大专院校相关专业的师生使用,也可作为广大电子爱好者的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

运算放大器应用电路设计/(日)马场清太郎著;何希才译. —北京:
科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018431-3

I. 运… II. ①马…②何… III. 运算放大器-应用-电路设计
IV. TN722.7 TM02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004089 号

责任编辑:刘红梅 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:路志平

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年4月第一次印刷 印张:22 1/2

印数:1—4 000 字数:430 000

定 价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前言

● 模拟技术的重要性

自然界中存在的化学量与物理量等都可以用模拟量表示,但现在很多电子装置内部都在进行数字化处理,这种处理满足“廉价”、“准确”、“多功能”三要素。也许有人认为很可惜,因为现在模拟电路剩下的只是电子装置的接口部分,即输入、输出与电源部分。从电子装置设计方面看,这种想法也许是正确的。然而,从综合电子电路设计方面看,数字电路的设计可采用数字集成电路来完成,这已经成为事实。在科技高速发展的现阶段,模拟电路的设计也需要像数字集成电路那样,采用模拟集成电路来完成。

本书不讨论处理高速化的有关问题,但是,数字电路也可作为模拟电路进行设计,高超的模拟电路设计技术才是竞争者获胜的关键。作者期望读者通过本书掌握模拟电路的分析方法与基本原理,追求更高的目标。

现在有些企业一般不进行集成电路的设计,而只对系统中的数字电路进行设计,将模拟电路设计委托给专业人士(模拟技术工作者)来做,因此,也许有人会认为今天学习模拟技术已经毫无意义了。然而,在构思电子装置(构想与概念)的框图进行系统设计时,也需要模拟电路的知识。若缺乏这方面的知识,则不能对噪声及各种故障采取有效的处理措施,也就不能很好地完成硬件设计工作。

● 掌握模拟技术

要想掌握模拟电路,需要理解电路的概念,并定性理解电路的工作原理。在定性理解电路的基础上,还要建立关系式定量理解电路的工作原理。本书首先概念性地介绍模拟电路的基础知识,然后通过实验进一步阐述相关内容。当然模拟电路涉及范围非常宽,由于作者经验有限,因此,不可能涉及模拟电路的方方面面,只限于通过基本电路的实验,使读者达到能够设计简单电路的水平。

实验用测量仪器有双踪示波器、数字万用表或电路测试器、直流电源及低频振荡器等。

进行电路设计时,首先要根据目的与规格选择适当的电路框图,综合考虑后再确定方案。这有点像搭积木游戏,该游戏中若有多种积木,则可进行各种组合,电路设计也一样,了解的电路越多,设计思路也就越宽。因此,本书尽量介绍更多的电路实例。

● 数学关系式的运用

要想进行模拟电路的设计,需要理解电路的工作原理,建立明确的关系式,通过计算求出电路常数。但“不能使用关系式”的地方就不能这样处理。

书中尽量给出简单明了的关系式。因为多元矩阵公式毕竟没有易懂的明确表示电气意义的简单关系式好理解,而且后者也容易发现错误。

由于作者水平有限,书中难免有纰漏之处,敬请读者批评指正。

马场清太郎

目 录

第 1 篇 基础知识篇

第 1 章 导 论	3
1.1 放大电路的作用	3
1.2 难学晶体管电路的原因	3
1.2.1 直流工作与交流工作需要分别处理	3
1.2.2 参数多且离散性大	4
1.2.3 理解晶体管电路工作原理的重要性	5
1.3 先掌握运算放大器电路的必要性	6
【专栏】 国际单位制词头与希腊字母	7
第 2 章 概 述	9
2.1 何谓运算放大器	9
2.1.1 运算放大器的诞生	9
2.1.2 作为理想元件处理	9
2.1.3 增益仅由电阻比决定	10
2.1.4 直流工作与交流工作不需要分开处理	10
2.2 运算放大器的特性参数	11
2.2.1 本书中列举的运算放大器	11
2.2.2 表示使用上极限值的“绝对最大额定值”	11
2.2.3 表示工作时性能的“电气特性”	12
【专栏】 分 贝	19
第 3 章 运算放大器的基础知识	21
3.1 电源的选用	21
3.1.1 电源的重要性	21
3.1.2 单电源工作方式与双电源工作方式	22
3.1.3 电源电压的大小	22

3.1.4 使用双电源时的电源接通顺序	23
3.1.5 旁路电容的接入	24
3.2 使用注意事项	25
3.2.1 未使用的运算放大器端子的处理	25
3.2.2 与外设连接时的处理	25
3.2.3 交调失真	26
【专栏】 运算放大器电路中使用的两个电气定律	26
3.3 运算放大器的种类与使用	27
3.3.1 运算放大器的种类	27
3.3.2 通用运算放大器	28
3.3.3 运算放大器的使用	28
3.3.4 双极型运算放大器与 CMOS 运算放大器的使用	29
第 4 章 运算放大器的基本工作原理	31
4.1 各端子的工作情况	31
4.1.1 运算放大器的两个输入端与一个输出端	31
4.1.2 运算放大器不加电源时不工作	32
4.2 信号放大时的运算放大器工作原理	32
4.2.1 两个输入端间电压差恒为 0V	32
4.2.2 虚短路应用实例	34
4.2.3 通过实验观察虚短路	34

第 2 篇 使用篇

第 5 章 动态范围	39
5.1 确保宽动态范围	39
5.1.1 输入与输出动态范围	39
5.1.2 数据表中运算放大器的动态范围	39
5.1.3 通过实验观察运算放大器的动态范围	40
5.2 增大输出电流的方法	44
5.2.1 负载电流增大则输出动态范围变窄	44
5.2.2 增设缓冲器	45
5.2.3 增设偏置电路	46
【专栏】 术 语	47

第 6 章 负反馈的使用	49
6.1 负反馈对各种特性的改善效果	49
6.1.1 增益精度的提高	49
6.1.2 噪声与失真的降低	53
6.1.3 输出阻抗的降低	54
【专栏】 负反馈	55
6.2 通过实验观察负反馈的效果	57
6.2.1 输出阻抗的降低	57
6.2.2 输入阻抗的增大	57
第 7 章 降低输出失调电压的方法	59
7.1 输出失调电压发生的原因与计算	59
7.1.1 用噪声增益进行评价	59
7.1.2 输入换算失调电压与输入偏置电流	59
7.2 降低输入换算失调电压的方法	60
7.2.1 方法①	60
7.2.2 方法②	61
7.2.3 方法③	61
【专栏】 噪声增益	62
7.3 减小输入偏置电流影响的方法	64
7.3.1 调整与反相端与同相端连接的电阻值	64
7.3.2 R_B 阻值的选择	64
7.3.3 失调电压的温度特性	65
7.4 通过实验观察输出失调电压降低的效果	67
7.4.1 有无 R_B 与输出失调电压的变化	67
7.4.2 降低失调的窍门与秘诀	68
7.4.3 通过实验观察降低失调的窍门	69
第 8 章 基本放大电路	71
8.1 反相放大电路	71
8.1.1 反相放大电路中可忽略 CMRR	71
8.1.2 反相放大电路的输入阻抗低	72
8.1.3 交流反相放大电路	72
8.2 T 型反馈电路	72
8.2.1 T 型反馈电路的优点	72
8.2.2 噪声增益的增大	73

8.3 同相放大电路	74
8.3.1 CMRR 引起同相放大电路误差的增大	74
8.3.2 同相放大电路的输入阻抗高	74
8.3.3 交流同相放大电路的输入阻抗	74
8.4 自举电路	75
8.4.1 增大交流同相放大电路输入阻抗的方法	75
8.4.2 增大反相放大电路输入阻抗的方法	76
8.5 可调电阻的使用方法	76
8.5.1 基本构造	76
8.5.2 可调电阻与电位器	76
8.5.3 碳膜可调电阻的使用方式	77
8.5.4 基本选用方式	77
8.6 增益与电平的调整方法	78
8.6.1 电平调整	78
8.6.2 增益调整	79
8.6.3 增益与电平的切换	80
8.6.4 通过实验观察增益调整情况	81
【专栏】 E 系列数值与允许误差及符号	83
第 9 章 积分电路与微分电路	85
9.1 积分电路	85
9.1.1 积分电路的概念	85
9.1.2 RC 积分电路	86
9.1.3 简化伯德图的画法	87
9.1.4 RC 积分电路的实验	89
9.1.5 密勒积分电路	90
9.1.6 运算放大器积分电路的误差	91
9.1.7 通过实验观察积分电路	93
9.1.8 加速电阻	94
9.1.9 各种积分电路	95
9.2 微分电路	96
9.2.1 微分电路的概念	96
9.2.2 RC 微分电路	97
9.2.3 通过实验观察 RC 微分电路	98
9.2.4 运算放大器微分电路	99
9.2.5 通过实验观察微分电路	100

9.3 复习基本的交流理论	101
9.3.1 交流电压与交流电流的时间表示方式	101
9.3.2 交流电压与交流电流的频率表示方式	101
9.3.3 瞬态时用 s , 稳态时用 $j\omega$	103
9.3.4 电阻的交流表示方式——阻抗与导纳	103
第 10 章 振荡的原因及对策	105
10.1 放大电路振荡的条件	105
10.1.1 运算放大器振荡时的输出波形	105
10.1.2 振荡条件—— $A\beta = -1$	106
10.2 设计不振荡放大电路的基础知识	107
10.2.1 利用伯德图判断放大电路是否振荡	107
10.2.2 增益裕量和相位裕量的最佳值	107
10.2.3 2 次滞后电路容易振荡	108
10.2.4 2 次滞后电路负反馈时的响应	108
10.3 运算放大器放大电路的不振荡设计	110
10.3.1 消除输入电容引起的电路工作的不稳定	110
10.3.2 消除负载电容引起的电路工作的不稳定	113
10.4 微分电路振荡的对策	115
10.4.1 微分电路容易振荡	115
10.4.2 典型失败实例	115
10.4.3 对 策	117
10.5 除运算放大器 IC 外的振荡因素的对策	117
10.5.1 增设射极跟随器时要接入电阻	117
10.5.2 注意配线引起相位的旋转	117
第 11 章 降低噪声的对策	119
11.1 主要的固有噪声	119
11.1.1 感应噪声以外的噪声——固有噪声	119
11.1.2 固有噪声的构成要素	119
11.2 固有噪声的性质	120
11.2.1 频率特性	120
11.2.2 时间变化	121
11.3 噪声电平的基本处理方式	122
11.3.1 噪声源为两个以上时的噪声电平	122
11.3.2 表示噪声频带的“等效噪声带宽”	122
11.4 构成固有噪声的各种噪声	124

11.4.1	能量消耗时产生的“热噪声”	124
11.4.2	半导体内部产生的“散粒噪声”	125
11.4.3	电导率变化产生的“接触噪声”	125
11.4.4	两个电极分别流经电流时产生的“分配噪声”	126
11.5	运算放大器放大电路的噪声	126
11.5.1	运算放大器 IC 噪声的计算方法	126
11.5.2	运算放大器放大电路的低噪声化技术	130
【专栏】	有关噪声的统计术语	132
11.5.3	有关参考文献	132

第 3 篇 应用电路篇

第 12 章	差动放大电路的设计	135
12.1	差动放大电路的基本工作原理	135
12.1.1	差模信号与共模信号	135
12.1.2	共模信号	136
12.1.3	共模信号产生的原因	136
12.1.4	单端放大电路与差动放大电路的工作原理	137
12.1.5	基本电路与工作原理	138
12.2	影响 CMRR 的三个因素	139
12.2.1	影响差动放大电路误差的因素	139
12.2.2	运算放大器 IC 自身的 CMRR 引起的误差	139
12.2.3	使用电阻引起的误差	140
12.2.4	信号源阻抗引起的误差	141
12.3	实用差动放大电路	142
12.3.1	不受信号源阻抗影响的电路	142
12.3.2	输入级放大电路具有较大增益的仪用放大器	142
12.3.3	高输入阻抗的差动放大电路	144
12.3.4	反转型差动放大电路	146
12.4	差动放大电路的调整	148
12.4.1	调整目的	148
12.4.2	调整方法	148
12.5	实际仪用放大器 IC	150
12.5.1	AD622 与 AD623A	150

12.5.2 失调电压与失调电流	152
12.6 差动放大电路的动态范围	152
12.6.1 输入的动态范围很重要	152
12.6.2 用单电源工作时差动放大电路的动态范围	153
12.7 各种差动放大电路的 CMRR 与输入输出特性	155
12.7.1 特性的实测	155
12.7.2 类型 I 的特征	159
12.7.3 类型 II 和类型 III 的特征	159
12.8 可靠工作的有关技术	159
12.8.1 充分发挥 CMRR 的特性	159
12.8.2 二极管保护电路与 CMRR	159
12.8.3 旁路电容与偏置电阻	160
12.9 获得更高 CMRR 特性的方法	160
12.9.1 浮置电源	161
12.9.2 输入滤波器	161
12.9.3 输入电缆	162
第 13 章 恒流电路与基准电压电路	165
13.1 恒流电路	165
13.1.1 恒流电路的概况	165
13.1.2 基本电路	166
13.1.3 其他恒流电路	167
13.1.4 功能等效电路的利用	167
13.1.5 输出电流的动态范围	168
13.1.6 提高精度的关键问题	169
13.2 实际恒流电路的特性	169
13.2.1 实 验	169
13.2.2 实验结果	170
13.3 直流基准电压电路的设计	172
13.3.1 基准电压电路	172
13.3.2 实际 IC 及其使用	172
13.3.3 高精度基准电压电路	173
第 14 章 电压-电流转换电路	175
14.1 电压转换为电流的电路	175
14.1.1 基本放大电路的转换电路	175
14.1.2 使地基准负载具有恒流的差动放大电路的转换电路	176

14.1.3	一个运算放大器的电压-电流转换电路	177
14.1.4	负载电阻不能过大	178
14.1.5	实际电压-电流转换电路的工作原理	178
14.1.6	仪表用电流环的应用	181
14.2	电流转换为电压的电路	181
14.2.1	电源线上电流的检测	182
14.2.2	电源电流检测电路的输入输出特性	184
14.2.3	电流-电压转换电路的工作原理与设计要点	184
第 15 章	加减运算电路	187
15.1	加减运算电路	187
15.1.1	基本电路	187
15.1.2	实际的加减运算电路	188
15.2	单电源工作的加减运算电路	189
15.2.1	只对交流信号进行加减运算的电路	189
15.2.2	直接加法电路	189
第 16 章	比较器电路	193
16.1	非线性电路	193
16.1.1	各种非线性电路	193
16.1.2	滞留时间	194
16.2	比较器 IC	195
16.2.1	比较器的基础知识	195
16.2.2	比较器与运算放大器的区别	196
16.3	各种比较器电路	202
16.3.1	基本电路	202
16.3.2	电流加法比较器电路	202
16.3.3	回差比较器电路	203
16.3.4	接口电路	204
16.4	比较器电路的实验	204
16.4.1	回差比较器	204
16.4.2	电流加法比较器	206
16.4.3	运算放大器与比较器构成的接口电路	206
16.5	防止噪声引起误动作的方法	207
16.5.1	必须接入电源旁路电容	207
16.5.2	具有回差特性	207
16.5.3	比较器输入前的信号进行放大	207

16.5.4 接入滤波器	208
16.5.5 响应速度需要的最低限	208
16.6 比较器的应用	209
16.6.1 PWM 调制电路	209
16.6.2 窗口比较器	209
16.6.3 电平检测电路	209
第 17 章 二极管应用电路	213
17.1 二极管的基础知识	213
17.1.1 基本特性	213
17.1.2 二极管的选择与使用	216
17.2 同相理想二极管电路	217
17.2.1 理想二极管电路	217
17.2.2 同相理想二极管电路的基本工作原理	217
17.3 反相理想二极管电路	219
17.3.1 反相理想二极管电路	219
17.3.2 基本工作原理	219
17.4 绝对值电路	220
17.4.1 绝对值电路(取出输入信号绝对值的电路)	220
17.4.2 电路的工作原理	221
17.4.3 失调可调整的绝对值电路	221
17.4.4 各种绝对值电路	222
17.5 理想二极管电路特性的改善方法	223
17.5.1 高频特性的改善	223
17.5.2 直流特性的改善	224
17.6 线性检波电路	224
17.6.1 线性检波电路(求出绝对平均值的电路)	224
17.6.2 高精度化与宽带化的方法	224
17.7 峰值保持电路	225
17.7.1 峰值保持电路(保持峰值的电路)	225
17.7.2 实用峰值保持电路的设计	226
17.7.3 比较器构成的高速峰值保持电路	226
17.8 限幅电路	227
17.8.1 限幅电路(将信号电平抑制在某值以下的电路)	227
17.8.2 限幅电路的应用(防止饱和的电路)	228
17.9 折线近似电路	229

第 18 章 有源滤波器	231
18.1 有源滤波器的基础知识	231
18.2 用有源滤波器替换无源滤波器	232
18.2.1 无源滤波器和有源滤波器的工作原理	232
18.2.2 2 节 RC 1 次滞后电路+正反馈构成 LC 无源 LPF	233
18.2.3 图 18.4 与图 18.3 示出相同特性	234
18.3 有源滤波器设计的自由度大	236
【专栏】表示对通过滤波器信号波形影响的“群延迟”	237
18.4 五种滤波器	237
18.5 1 次/2 次滤波器的传递函数与频率特性的关系	238
18.5.1 LPF 的传递函数与频率特性	239
18.5.2 HPF 的传递函数与频率特性	240
18.5.3 2 次 BPF 的传递函数与频率特性	242
18.5.4 2 次 BEF 的传递函数与频率特性	242
18.5.5 APF 的传递函数与频率特性	243
【专栏】滤波器的传递函数	244
第 19 章 有源低通滤波器的设计	247
19.1 LPF 设计步骤	247
19.1.1 步骤①——选择频率特性	247
19.1.2 步骤②——决定电路方式与常数	249
19.1.3 通过仿真确认频率特性	250
19.2 Sallen-Key LPF 设计实例	250
19.2.1 Sallen-Key 电路	250
19.2.2 利用正规化表求出传递函数	254
19.2.3 决定常数	254
19.2.4 通过仿真确认特性	258
19.2.5 元件误差对特性影响的研究	259
19.3 实用 LPF 设计的先进技术	260
19.3.1 扩大动态范围(后接高 Q 值电路)	260
19.3.2 减小噪声(在前级接高 Q 值的电路)	260
19.3.3 奇次 Sallen-Key LPF 的泄漏小	261
19.3.4 直流失调输出的对策	261
19.4 Sallen-Key 电路+1 个电阻构成高性能的多重反馈型 LPF	262
19.4.1 失真小,直流增益可自由设定	262
19.4.2 多重反馈型 LPF 的缺点	262

19.5	LC 模拟滤波器	263
19.6	LC 模拟滤波器的典型电路——“FDNR 滤波器”的设计	264
19.6.1	FDNR(输入阻抗特性与频率平方成反比例的电路)	264
19.6.2	设计步骤	264
19.6.3	频率特性偏差大但增益偏差小	266
第 20 章	高通、带通、带阻及全通滤波器的设计	267
20.1	高通滤波器 HPF 的设计	267
20.1.1	设计步骤与 LPF 相同	267
20.1.2	Sallen-Key HPF 的设计	267
20.1.3	有源 HPF 的缺点	268
20.2	带通滤波器 BPF 的设计	269
20.2.1	常数计算的基本步骤	269
20.2.2	多重反馈型 BPF	270
20.2.3	DAPF 型 BPF	271
20.3	带阻滤波器 BEF 的设计	272
20.3.1	传递函数与常用电路	272
20.3.2	BEF 的应用实例	274
20.3.3	f_0 的调整	274
20.3.4	调整后的特性	276
20.3.5	失真成分提取电路的应用	277
【专栏】	高精度滤波器的调整方法	278
20.4	全通滤波器 APF 的设计	279
第 21 章	RC 正弦波振荡电路	281
21.1	正弦波振荡电路的种类与选用	281
21.1.1	按频率选择电路可分为三类	281
21.1.2	着眼于振荡频率	282
21.1.3	着眼于振荡频率的稳定度	282
21.1.4	减小高次谐波失真率时	282
21.2	RC 振荡电路的工作原理	282
21.2.1	RC 振荡电路是有源 BPF 的扩展电路	282
21.2.2	与负反馈振荡电路的不同之处	282
21.2.3	振荡启动条件($A\beta > 1$ 加上触发信号)	283
21.2.4	振荡开始后振幅与频率保持恒定	283
21.3	各种 RC 振荡电路	284
21.3.1	文氏电桥振荡电路	284

21.3.2 桥式 T 型振荡电路	284
21.3.3 状态变量型振荡电路	286
21.4 RC 振荡电路的核心部分“振幅控制电路”	287
21.4.1 振幅控制电路	287
21.4.2 实用的振幅控制电路	287
21.4.3 高次谐波失真的产生	288
21.5 频率可变的情况	289
21.6 RC 振荡电路的实验	290
21.6.1 文氏电桥振荡电路	290
21.6.2 桥式 T 型振荡电路	291
21.6.3 状态变量型振荡电路	292
【专栏】 传递函数与 s 平面	293
第 22 章 LC 正弦波振荡电路	297
22.1 LC 振荡电路的特征与基本工作原理	297
22.1.1 得到比 RC 振荡电路失真低的特性	297
22.1.2 将有源元件换成电流-电压变换元件	297
22.1.3 科耳皮兹与哈脱莱振荡电路	298
22.1.4 实际的振荡电路	299
22.2 科耳皮兹振荡电路	300
22.2.1 负反馈电路中接入电阻与有源元件可得到必要的增益 ..	300
22.2.2 实际的振荡形式	302
22.3 哈脱莱振荡电路	302
22.3.1 按照大概计算得到常数的工作情况	302
22.3.2 实际电路(使用带抽头的电感线圈)	303
22.3.3 实际振荡情况	303
22.4 富兰克林振荡电路	304
22.4.1 控制放大电路特性就能稳定振荡	304
22.4.2 用一个反相器时元件选择很麻烦	305
22.4.3 实际振荡情况	305
22.5 各种 LC 振荡电路的频率稳定性	306
【专栏】 射极跟随器振荡的原因及对策	306
第 23 章 机械振子正弦波振荡电路	309
23.1 机械振子振荡电路的种类与特征	309
23.1.1 典型机械振子陶瓷与石英	309
23.1.2 机械振子以多个频率进行振荡	309

23.2 石英振子与陶瓷振子的不同之处	310
23.2.1 关注 Q_m 与 Δf	310
23.2.2 振荡的形式	311
23.3 各种机械振子的振荡电路	312
23.3.1 萨巴洛夫振荡电路	312
23.3.2 泛音振荡电路	313
第 24 章 多谐振荡器与函数发生器	315
24.1 弛张振荡电路	316
24.1.1 由 H/L 电平状态存储电路与时间常数电路组成	316
24.1.2 在时域而不在频域分析工作情况	316
24.2 无稳态多谐振荡器	316
24.2.1 多谐振荡器	316
24.2.2 使用回差比较器构成自激多谐振荡器	317
24.2.3 占空比可变的自激多谐振荡器	321
24.2.4 使用逻辑反相器 IC 构成的自激多谐振荡器	322
24.2.5 自激多谐振荡器专用 IC	323
24.2.6 IC 内置自激多谐振荡器	324
24.3 函数发生器	326
【专栏】 函数波形的有效值与平均值	332
参考及引用*文献	335