

模拟集成电路 原理与应用

吴运昌 编

华南理工大学出版社

412256

模拟集成电路原理与应用

吴运昌 编著



华南理工大学出版社
· 广州 ·

内 容 简 介

本书内容包括通用 MOS 模拟集成电路、信号产生电路与变换电路、集成定时电路、模拟集成乘法器、集成锁相环路与集成频率合成器、集成数—模与模—数转换器、集成稳压器和开关电容电路等八章。

本书对各种功能的双极型和 MOS 型模拟集成电路的工作原理、分析方法及应用电路进行了全面、系统的论述；列举了大量的典型应用电路；对集成频率合成器、开关稳压电源电路、开关电容电路等新技术、新电路、新集成组件作了较详细的分析和介绍。各章后面附有思考题与习题。

本书可作为大专院校（包括普通高校、电大、夜大、职大）电子、通讯、自动控制与电力类各专业本科的教材或教学参考书；也可以用作相关专业专科（包括函授、自学考试）的教材或教学参考书；还可以供从事电子技术工作的科技人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟集成电路原理与应用/吴运昌编著. —广州：华南理工大学出版社，1995.6
ISBN 7-5623-0851-9

- I. 模…
- II. 吴…
- III. 模拟集成电路
- IV. TN431.1

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮码 510641)

责任编辑：傅穗文

各地新华书店经销

华南理工大学出版社电脑室排版

广州市利达印刷厂印刷

*

1995年9月第1版 1995年9月第1次印刷

开本：787×1092 1/16 印张：23 字数：560千

印数：0 001—5 000

定价：25.00 元

前 言

随着半导体集成技术和微电路设计技术的迅速发展,模拟集成电路的品种和数量与日俱增,集成度越来越高。涌现出的大量各种多功能的通用模拟集成电路及不断推出的具有各种功能的专用模拟集成电路不仅使电子技术的各个运用领域,如计算技术、自动控制、自动测量、遥控遥测、雷达、导航、导弹、核武器、通讯、广播、电视、医疗、仪器、仪表及家用电器等的设备和电路设计得以简化,而且使系统及设备的性能指标发生了飞跃。因此,无论是大专院校电气工程类的学生,还是广大从事电子技术工程的人员都有必要加强模拟集成电路基本知识的学习,掌握其基本理论和应用理论,熟悉模拟集成组件构成的应用电路和分析方法,以便更好地应用模拟集成电路,充分发挥和开发模拟集成电路的各种功能。

本书共分为八章,第一章首先讨论 MOS 模拟集成电路基础,为后继章节中 MOS 集成电路的分析打下理论基础,同时介绍了 MOS 运算放大器、MOS 电压比较器及 MOS 模拟开关电路;第二章重点讲述集成运算放大器在信号的产生与变换方面的运用,同时介绍了单片 VFC、S/H 集成电路;第三章讲述各类型单片集成定时器和集成定时器/计数器;第四章讲述模拟集成乘法器;第五章讲述集成锁相环路与集成频率合成器;第六章讲述 A/D、D/A 转换器及单片集成数据采集器,并重点介绍了它们与微计算机系统的各种连接方式;第七章讲述集成稳压器,并着重介绍了开关电源工作原理及单片集成开关稳压器;第八章讲述开关电容电路的工作原理。

本书较全面和系统地论述了近年来双极型和 MOS 型模拟集成电路的工作原理、分析方法、特点、应用电路、系统的组成和发展情况。既介绍普遍应用的模拟集成电路,也介绍新技术、新电路、新集成组件。讲述各类模拟集成电路时,既着重介绍集成电路的工作原理及其特性,也介绍其在各个方面的典型应用电路及其调试,并通过对典型应用电路的分析,力求使读者掌握分析各类模拟集成组件组成的应用电路的方法。书中列举了大量模拟电路与数字电路及模拟电路与微计算机的接口技术和接口电路,分析了由多片多种模拟集成组件构成的多种应用系统,以利于提高读者设计模/数接口电路及应用系统的能力。

本书适合作大专院校(包括普通高校、广播电视大学、职工大学、夜大学)电子、通讯、自动控制、电力类各专业本科和专科(包括函授、自学考试)的教材或教学参考书;也可供从事电子技术工作的科技人员参考。

本书各章在基本原理方面,互相衔接,前后呼应;应用电路和应用系统方面则具有相对独立性和完整性。用作教材时,可根据各类专业及学生层次的不同教学要求选修有关章节。

全书由华南理工大学黄贯光教授审阅,李于凡、丘水生教授和王定中、秦允阁副教授对编写提纲提了许多宝贵的建议,在此一并致以衷心感谢。

限于作者水平,书中错漏和不妥之处,恳请读者指正。

编 著 者

1995 年 1 月于华南理工大学

目 录

第一章 通用 MOS 模拟集成电路	1
第一节 MOS 模拟集成电路基础	1
一、MOS FET 的工作特性	1
(一) 伏安特性	1
(二) 背栅控制特性及亚阈值导电特性	3
(三) MOS FET 交流小信号等效模型	4
二、MOS 模拟集成电路基本单元电路	4
(一) MOS FET 电流源电路	5
(二) MOS 单级放大电路	6
(三) MOS 输出级电路	10
第二节 MOS 集成运算放大器	11
一、NMOS 集成运算放大器	11
二、CMOS 集成运算放大器	12
(一) 5G14573 CMOS 运放	12
(二) 5G7650 CMOS 运放	14
三、MOS 集成运算放大器应用例	16
(一) 5G7650 高增益放大电路	17
(二) 5G7650 桥式放大电路	18
第三节 MOS 集成电压比较器	18
一、自稳零 MOS 电压比较器工作原理	19
(一) NMOS 自稳零电压比较器	19
(二) CMOS 自稳零电压比较器	19
二、5G14574 四电压比较器	20
(一) 工作原理	20
(二) 主要性能指标	20
三、MOS 集成电压比较器的应用	21
(一) 单窗孔比较电路	21
(二) 四窗孔比较电路	22
第四节 MOS 集成模拟开关电路	22
一、MOS FET 的开关特性	22
(一) NMOS 开关电路	22
(二) CMOS 开关电路	24

二、模拟开关电路工作原理	25
(一) 四双向模拟开关电路	25
(二) 多路模拟开关电路	27
三、模拟开关电路的应用	29
(一) 多通道模拟数据选择器	30
(二) 程控增益放大器	30
(三) 开关式带通滤波器	31
思考题与习题	32
第二章 信号产生电路与变换电路	36
第一节 信号发生器	36
一、正弦波发生器	36
(一) 移相式正弦波发生器	36
(二) 文氏桥式正弦波发生器	37
(三) 双T选频网络正弦波发生器	39
(四) 正交信号发生器	40
二、方波发生器	41
三、三角波发生器	43
四、锯齿波发生器	45
五、单稳态及双稳态触发器	47
(一) 单稳态触发器	47
(二) 双稳态触发器	49
六、阶梯波发生器	49
第二节 波形变换电路	51
一、检波与绝对值电路	51
(一) 检波电路	51
(二) 绝对值电路	52
二、限幅电路	54
(一) 串联限幅电路	54
(二) 并联限幅电路	54
(三) 双向限幅电路	55
(四) 死区电路	57
三、函数发生器	59
(一) 运放电路非线性闭环传输特性的产生	60
(二) 二极管函数发生器	60
第三节 电压—电流变换电路	63
一、电流/电压变换电路	63
二、电压/电流变换电路	64
(一) 负载不接地 V/I 变换电路	64

(二) 负载接地 V/I 变换电路	65
第四节 电压—频率变换电路	65
一、运放 VFC 电路	66
(一) 简单的 VFC 电路	66
(二) 复位型 VFC 电路	67
(三) 反馈型 VFC 电路	68
(四) 恒流源复位型 VFC 电路	69
二、集成化 VFC 电路	71
(一) LM131 系列	71
(二) AD650	75
第五节 采样—保持电路	80
一、采样—保持电路基本工作原理及性能	80
(一) S/H 电路基本工作原理	80
(二) S/H 电路性能指标	81
二、集成运放采样—保持电路	81
(一) 反相型 S/H 电路	81
(二) 同相型 S/H 电路	82
三、单片集成采样—保持电路	83
(一) HA-2420	83
(二) AD582	83
四、峰值检出电路	83
(一) 同相峰值检出电路	84
(二) 反相峰值检出电路	84
思考题与习题	84
第三章 集成定时电路	89
第一节 集成定时器 555/556 工作原理	89
一、双极型 555 定时器	89
(一) NE555 工作原理	89
(二) NE555 的主要参数及引脚功能	91
二、CMOS 型 556 定时器	92
(一) ICM7556 工作原理	92
(二) ICM7556 的主要参数	93
第二节 集成定时器 555/556 的基本工作方式	93
一、单稳态工作方式	94
二、双稳态工作方式	95
三、无稳态工作方式	96
第三节 集成定时器 555/556 的应用	97
一、定时电路	97

(一) 短时定时电路	97
(二) 长延时定时电路	98
二、波形发生器与调制器	98
(一) 方波发生器	98
(二) 数控脉冲发生器	99
(三) 三角波发生器	99
(四) 锯齿波发生器	100
(五) 脉冲调制器	100
三、变换电路	102
(一) 电压/频率变换电路	102
(二) DC/DC 变换电路	104
(三) 非电量/频率变换电路	105
四、检测与控制电路	106
(一) 微电机正反转控制电路	106
(二) 温度控制电路	106
(三) 自动复位触电保安电路	107
(四) 自动路灯控制电路	108
五、触摸开关电路与报警电路	108
(一) 触摸开关电路	108
(二) 光电报警电路	108
(三) 警笛电路	109
第四节 其它类型集成定时器	109
一、355 定时器	109
(一) 355 定时器的组成及主要特点	109
(二) 355 定时器的典型应用	110
二、LM122 系列定时器	110
(一) LM122 系列定时器电路组成、引脚功能及主要参数	111
(二) LM122 系列定时器电路工作原理	112
(三) LM122 系列定时器的典型应用	114
第五节 集成定时器/计数器	115
一、XR2240 可编程定时器/计数器	115
(一) XR2240 电路组成、引脚功能及主要参数	115
(二) XR2240 的典型应用	116
二、XR2242 不可编程定时器/计数器	118
思考题与习题	118
第四章 模拟集成乘法器	120
第一节 模拟集成乘法器的基本概念与特性	120
一、模拟乘法器的工作象限	120

二、模拟乘法器的传输特性	121
(一) 四象限输出特性	121
(二) 平方律输出特性	121
三、模拟乘法器的线性与非线性性质	121
第二节 模拟乘法器工作原理及其运算误差和技术参数	122
一、模拟乘法器工作原理	122
(一) 二象限变跨导模拟乘法器	122
(二) 双平衡模拟乘法器	123
(三) 线性化双平衡模拟乘法器	124
二、模拟乘法器的运算误差和技术参数	125
(一) 模拟乘法器的运算误差	126
(二) 模拟乘法器的技术参数	127
第三节 双极型模拟集成乘法器	128
一、BG314 型集成乘法器	128
(一) BG314 型乘法器电路	128
(二) BG314 型乘法器的技术参数	128
(三) BG314 型乘法器外围元件设计计算	128
(四) BG314 型乘法器的调整	131
二、AD532 型及 AD534 型集成乘法器	132
(一) AD532 型集成乘法器	132
(二) AD534 型集成乘法器	133
第四节 MOS 型模拟集成乘法器	134
一、NMOS 集成乘法器	134
(一) NMOS 集成乘法器原理	134
(二) 线性化 NMOS 集成乘法器	135
二、CMOS 集成乘法器	136
(一) CMOS 线性化乘法器原理	136
(二) CMOS 集成乘法器电路分析	137
第五节 模拟集成乘法器在运算电路中的应用	138
一、乘法与平方运算电路	138
二、除法与开方运算电路	139
三、均方根运算电路	142
四、函数发生电路	142
第六节 模拟集成乘法器在信号处理方面的应用	143
一、调制电路	144
(一) 调幅电路	144
(二) 调频电路	147
二、混频与倍频电路	148
(一) 混频电路	148

(二) 倍频电路	149
三、解调电路	150
(一) 同步解调电路	150
(二) 鉴相电路	152
(三) 鉴频电路	155
四、自动增益控制电路	157
五、压控三角波与方波发生器	157
思考题与习题	159
第五章 集成锁相环路与集成频率合成器	162
第一节 锁相环路的工作原理与性能	162
一、锁相环路的组成	162
(一) 鉴相器	162
(二) 环路滤波器	163
(三) 压控振荡器	163
二、锁相环路相位模型和基本方程	164
三、锁相环路的工作原理	165
四、锁相环路的基本特性和参数	166
(一) 锁相环路的基本特性	166
(二) 锁相环路的特性参数	166
第二节 集成锁相环路中常用单元电路	167
一、集成鉴相器	167
(一) 数字式鉴频鉴相器	167
(二) 门鉴相器	168
二、环路滤波器	169
(一) RC 积分滤波器	169
(二) 无源比例积分滤波器	170
(三) 有源比例积分滤波器	170
三、集成压控振荡器	171
(一) 积分—施密特触发压控多谐振荡器	171
(二) 射极定时压控多谐振荡器	172
(三) 变容二极管压控振荡器	173
(四) 差动式晶体压控振荡器	174
(五) 数字门压控振荡器	175
第三节 通用单片集成锁相环路	176
一、NE562	177
(一) 电路工作原理	177
(二) NE562 的使用与调整方法	180
二、NE564	182

(一) 限幅放大器工作原理	183
(二) 鉴相器 PD 工作原理	184
(三) 压控振荡器 VCO 工作原理	184
(四) 放大器和直流恢复电路工作原理	184
(五) 施密特触发器工作原理	185
三、NE565	185
(一) 鉴相器 PD 及直流放大器工作原理	185
(二) 环路滤波器 LF 工作原理	186
(三) 压控振荡器 VCO 工作原理	187
四、CD4046	187
第四节 集成锁相环路的应用	189
一、锁相调制电路	189
(一) FM 调制电路	189
(二) FSK 调制电路	190
二、锁相解调电路	191
(一) FM 解调电路	191
(二) FSK 解调电路	192
(三) AM 同步解调电路	193
(四) DSB/SC 同步解调电路	194
(五) PSK 相干解调电路	195
(六) 位同步信号提取电路	196
(七) 电话双音频拨号解码电路	196
三、锁相倍频、分频与混频电路	197
(一) 倍频器	197
(二) 分频器	198
(三) 混频器	198
四、锁相跟踪滤波器	198
第五节 锁相环频率合成器的组成及原理	200
一、频率合成器的主要性能指标	200
二、锁相环频率合成器的组成及原理	201
(一) 单环锁相频率合成器	201
(二) 多环锁相频率合成器	204
(三) 小数分频锁相频率合成器	205
第六节 单片集成锁相环频率合成器	206
一、MC145106 电路原理及其应用	206
(一) 电路原理	206
(二) 典型应用	207
二、MC145146 电路原理及其应用	208
(一) 电路原理	208

(二) 典型应用	210
三、MC145152 电路原理及其应用	211
(一) 电路原理	211
(二) 典型应用	212
四、MC145156 电路原理及其应用	213
(一) 电路原理	213
(二) 典型应用	214
思考题与习题	218
第六章 集成数—模与模—数转换器	220
第一节 D/A 转换器基本原理及其特性	220
一、D/A 转换器转换特性	220
二、D/A 转换器基本工作原理	221
(一) 加权电阻 D/A 转换器	221
(二) $R-2R$ T 型电阻 D/A 转换器	221
(三) $R-2R$ 倒 T 型电阻 D/A 转换器	222
(四) 加权电流 D/A 转换器	223
(五) 加权电容 D/A 转换器	223
(六) 乘法 D/A 转换器	224
三、D/A 转换器的转换误差及技术指标	225
(一) D/A 转换器转换误差	225
(二) D/A 转换器的技术指标	225
第二节 单片集成 D/A 转换器	226
一、双极型 D/A 转换器 AD DAC-08	226
(一) 主要特性	226
(二) 工作原理	227
(三) 基本使用方法	228
二、CMOS D/A 转换器 5G7520	228
(一) 主要特性	229
(二) 工作原理	229
(三) 基本使用方法	230
第三节 D/A 转换器的应用	232
一、D/A 转换器应用实例	232
(一) 数控放大器	232
(二) 数控滤波器	233
(三) 数控延时器	233
(四) 数控信号发生器	234
(五) 数控电压源	234
(六) 数控电流源	235

二、D/A 转换器与微处理器的接口方式	235
(一) 直接与 CPU 相联	236
(二) 利用外部数据寄存器与 CPU 相联	240
(三) 利用专用 I/O 接口组件与 CPU 相联	241
三、D/A 转换器的选用与调整	242
(一) D/A 转换器的选用	242
(二) D/A 转换器的调整	243
第四节 A/D 转换器基本原理及其特性	244
一、A/D 转换器转换特性	244
二、A/D 转换器基本工作原理	246
(一) 计数式 A/D 转换器	246
(二) 逐次比较式 A/D 转换器	246
(三) 并行比较式 A/D 转换器	247
(四) 串并行比较式 A/D 转换器	248
(五) 双积分 V—T 式 A/D 转换器	248
三、A/D 转换器的转换误差及技术指标	249
(一) A/D 转换器转换误差	249
(二) A/D 转换器的技术指标	250
第五节 单片集成 A/D 转换器	251
一、AD574	251
(一) 主要特性	251
(二) 工作原理	252
(三) 与 CPU 的接口电路	253
二、ADC 0801	256
(一) 主要特性	256
(二) 工作原理	257
(三) 与 CPU 的接口电路	258
三、5G14433	261
(一) 主要特性	261
(二) 工作原理	261
(三) 典型应用	263
四、A/D 转换器的选用与调整	267
(一) A/D 转换器的选用	267
(二) A/D 转换器的调整	268
第六节 单片集成数据采集器	269
一、数据采集系统	269
二、SDM857 系统原理及应用	269
(一) SDM857 系统的特性	270
(二) SDM857 的组成及原理	270

(三) SDM857 的应用	272
思考题与习题	273
第七章 集成稳压器	275
第一节 概述	275
一、集成稳压器的特点及其分类	275
(一) 集成稳压器的特点	275
(二) 集成稳压器的分类	275
二、集成稳压器的主要参数	276
(一) 特性参数	276
(二) 工作参数	277
三、集成稳压器中基本电路	278
(一) 调整管	278
(二) 基准电压电路	278
(三) 比较放大电路	281
(四) 恒流源电路	281
(五) 启动电路	281
(六) 保护电路	282
第二节 集成稳压器典型电路分析	283
一、多端可调稳压器 W723	284
(一) 电路原理	284
(二) 极限参数	285
(三) 基本应用	285
二、三端固定式正电压稳压器 SW7800	286
(一) 电路原理	286
(二) 极限参数	287
(三) 基本应用	288
三、三端固定式负电压稳压器 SW7900	288
(一) 电路原理	288
(二) 极限参数	290
(三) 基本应用	290
四、三端可调式正电压稳压器 CW117	290
(一) 电路原理	290
(二) 极限参数	292
(三) 基本应用	292
第三节 集成稳压器的应用	292
一、输入电压扩展稳压电源	293
(一) 电阻降压法	293
(二) 有源器件降压法	293

二、输出电压扩展稳压电源	293
(一) 多端集成稳压器输出电压扩展	293
(二) 三端集成稳压器输出电压扩展	294
三、输出电流扩展稳压电源	295
(一) 多端集成稳压器输出电流扩展	295
(二) 三端集成稳压器输出电流扩展	296
四、功能扩展稳压电源	297
(一) 正、负输出稳压电源	297
(二) 正、负跟踪稳压电源	298
(三) 恒流电源	298
(四) 受控稳压电源	299
第四节 开关稳压电源工作原理	300
一、开关稳压电源的特点	300
二、开关稳压电源的组成与分类	300
(一) 开关稳压电源的组成	300
(二) 开关稳压电源的分类	300
三、开关稳压电源的工作原理	302
(一) 降压型输出电路	302
(二) 升压型输出电路	304
(三) 反极型输出电路	305
第五节 集成开关稳压器及其应用	306
一、CW1524 系列	306
(一) 电路组成及原理	306
(二) 应用集成开关稳压器应注意的一般问题	308
(三) 典型应用电路	309
二、L4960 系列及 W296	311
(一) 电路组成及原理	312
(二) 典型应用电路	313
三、MC34063 与 $\mu A78S40$	316
(一) 电路组成及原理	316
(二) 典型应用电路	317
思考题与习题	319
第八章 开关电容电路	322
第一节 开关电容电路的基本概念	322
一、开关电容电路的组成	322
(一) MOS 电容	322
(二) MOS FET 开关	322
(三) MOS 运算放大器	322

(四) 时钟信号	323
二、基本开关电容单元	323
(一) 并联开关电容单元	323
(二) 串联开关电容单元	325
三、电荷守恒原理	327
(一) 电荷守恒原理	327
(二) 电荷守恒原理应用例	327
第二节 开关电容电路的分析方法	328
一、开关电容电路输出信号一般表示法	329
二、开关电容电路的时域分析法	329
(一) 一般方法	329
(二) Z 变换方法	331
三、开关电容电路的频域分析法	331
(一) 离散时间频域分析	331
(二) 连续时间频域分析	333
第三节 基本开关电容电路	335
一、开关电容积分器	335
(一) SC 反相积分器	335
(二) SC 差动积分器	336
二、开关电容延时器	337
(一) 延时 $T_c/2$ 的 SC 延时器	337
(二) 延时 $3T_c/4$ 的 SC 延时器	337
三、开关电容放大器	338
四、开关电容振荡器	340
五、开关电容模拟乘法器	340
六、开关电容 D/A 与 A/D 转换器	343
(一) 开关电容 D/A 转换器	343
(二) 开关电容 A/D 转换器	344
七、开关电容滤波器	345
(一) 一阶开关电容滤波器	345
(二) 二阶开关电容滤波器	345
(三) 单片集成开关电容滤波器	347
思考题与习题	349

第一章 通用 MOS 模拟集成电路

MOS FET 与 BJT 相比,具有许多突出的优点:MOS FET 是电压控制器件,输入偏流很小(10^{-12} A 以下),输入电阻高(10^{12} Ω 以上);MOS FET 功耗小,集成度高,抗辐射能力强;MOS 工艺简单,便于大规模集成。因此,自 70 年代以来,MOS 模拟集成电路得到了迅速发展,各种功能的集成电路不断涌现,其性能不断提高。由 MOS FET 构成的模拟集成电路,如运放、电压比较器、模拟开关、定时器、开关电容电路、乘法器、锁相环路、频率合成器、A/D 与 D/A 转换器、脉冲调制编码/解码器等已广泛应用于电子技术各个领域。尤其是采用 MOS 工艺可以使模拟信号处理技术与数字处理及计算技术有机结合起来,融为一体,构成模拟信号数字化的单片集成系统,促进了通讯、图像、声音、雷达信号处理及其它技术领域的发展。

本章首先介绍 MOS 模拟集成电路的基础知识,接着重点介绍 MOS 集成运放、集成电压比较器、模拟开关的工作原理及应用。其它 MOS 模拟集成电路将在后面各章中介绍。

第一节 MOS 模拟集成电路基础

一、MOS FET 的工作特性

(一) 伏安特性

四种 MOS FET 的伏安特性曲线如图 1-1-1 所示。这里以 NMOS FET 为例讨论它在工作区域的基本关系式。

1. 增强型 MOS FET

(1) 可变电阻区

当 $v_{GS} > V_T$ (增强型 MOS FET 的开启电压), $0 < v_{DS} < (v_{GS} - V_T)$ 时, MOS FET 工作于可变电压区, i_D 受 v_{DS} 、 v_{GS} 控制,表示为

$$i_D = \beta_n \left[(v_{GS} - V_T)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right] \quad (1-1-1)$$

其中增益系数 β_n 为

$$\beta_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad (\text{mA/V}^2) \quad (1-1-2)$$

式中 μ_n 为 N 沟道中电子迁移率(约 $600 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), C_{ox} 为栅极氧化层单位面积电容量[约 $(3 \sim 4) \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$], W 为沟道宽度, L 为沟道长度。

在 v_{DS} 很小时, $v_{DS}^2/2$ 项可忽略,式(1-1-1)变成

$$i_D \approx \beta_n (v_{GS} - V_T)v_{DS} \quad (1-1-3)$$