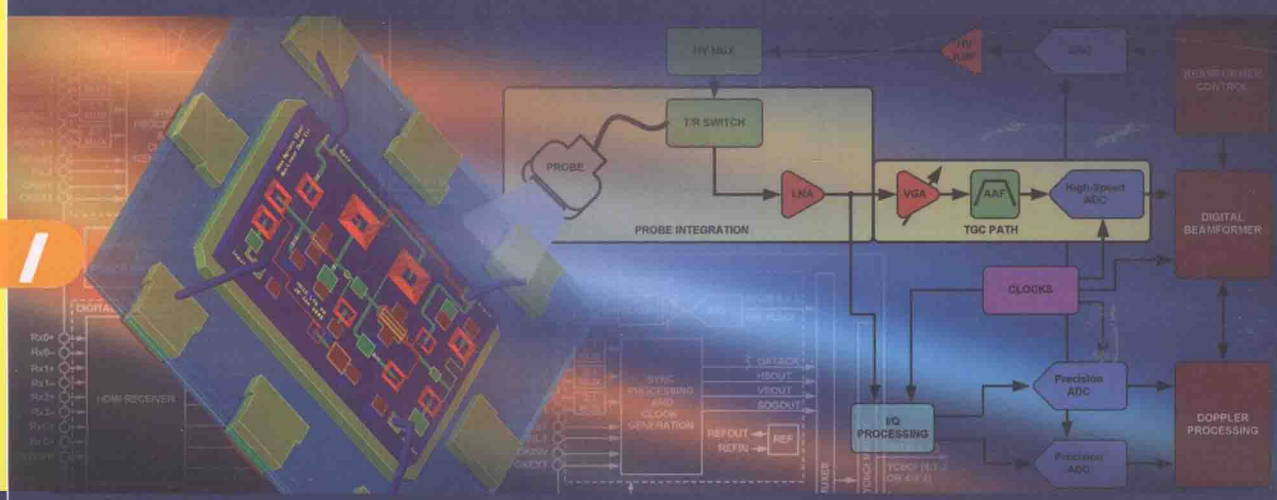


电子工程技术丛书

嵌入式系统中的 模拟电路设计 (第2版)

● 黄智伟 李月华 编著

http://www.phei.com.cn



电子工程技术丛书

嵌入式系统中的模拟电路设计

(第2版)

黄智伟 李月华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

模拟无处不在，模拟电路是嵌入式系统中不可缺少的重要组成部分。本书共6章，着重介绍了模数转换器（ADC）的驱动电路设计、数模转换器（DAC）的输出电路设计、抗混叠滤波器电路设计、电压基准电路的选择与设计、模数混合系统的PCB设计及模拟前端（AFE）电路设计。

本书内容丰富，叙述详尽清晰，图文并茂，通过大量的设计实例说明嵌入式系统中的模拟电路设计的一些技巧与方法以及应该注意的问题，工程性好，实用性强。

本书可以作为电子工程技术人员进行嵌入式系统硬件电路设计的参考书，也可以作为本科院校和高职高专电子信息工程、通信工程、自动化、电气、计算机应用等专业学习嵌入式系统硬件设计的教材，以及作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式系统中的模拟电路设计/黄智伟，李月华编著. —2版. —北京：电子工业出版社，2014.3
（电子工程技术丛书）

ISBN 978-7-121-22460-7

I. ①嵌… II. ①黄… ②李… III. ①①微型计算机-模拟电路-电路设计 IV. ①TP360.1

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第023809号

责任编辑：刘海艳（lhy@phei.com.cn）

印 刷：北京京师印务有限公司

装 订：北京京师印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：19.75 字数：506千字

印 次：2014年3月第1次印刷

印 数：3000册 定价：58.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

嵌入式系统是一个数字系统。套用一句广告词“Analog is everywhere”(模拟无处不在),模拟电路也是嵌入式系统中不可缺少的重要组成部分。模拟电路在嵌入式系统中起着重要的作用,一些难以解决的问题,如 ADC 产生的混叠现象,采用数字滤波和软件处理很难或者无法解决,然而采用一个运算放大器和几个电阻和电容就能够较好地解决该问题。例如,在一个 12 位 ADC 采样系统中,如不采用抗混叠滤波器电路,测试采样 1024 个代码,噪声代码宽度为 44 个代码,LSB 为 1.22mV,则 44 个代码的噪声为 53.68mV;而增加一个抗混叠滤波器电路后,噪声代码宽度仅为 1 个代码,噪声为 1.22mV。要设计一个能够满足要求的嵌入式系统,不仅需要考虑嵌入式处理器的电路设计和软件编程,也需要考虑与其相关的模拟电路的设计。

本书是为从事嵌入式系统硬件设计的电子工程技术人员编写的一本介绍嵌入式系统中的模拟电路设计基本知识、设计要求与方法的参考书。本书没有大量的理论介绍和公式推导,而是从工程设计要求出发,通过介绍大量的模拟电路设计实例,图文并茂地说明模拟电路设计中的一些技巧与方法,以及应该注意的问题,具有很好的工程性和实用性。

本书也可以作为本科院校和高职高专电子信息工程、通信工程、自动化、电气、计算机应用等专业学习嵌入式系统硬件设计的教材,以及作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材。

本书共 6 章。

第 1 章模数转换器(ADC)的驱动电路设计,介绍了影响 ADC 精度的一些技术指标,如何为 ADC 选择合适的驱动缓冲器,放大器电路设计中应注意避免的一些问题,单电源运算放大器电路设计应考虑的问题,基于运算放大器的 ADC 驱动电路,基于仪表放大器的 ADC 驱动电路,高速差分 ADC 驱动器和基于差分放大器的 ADC 驱动电路,以及 ADC 输入采样保持电路。

第 2 章数模转换器(DAC)的输出电路设计,介绍了影响 DAC 精度的一些技术指标,DAC 的输出电路。

第 3 章抗混叠滤波器电路设计,介绍了抗混叠滤波器基本特性,OP 构成的抗混叠滤波器电路,集成的抗混叠滤波器电路。

第 4 章电压基准电路设计,介绍了电压基准的选择,单片电压基准电路,输出电压可调的电压基准电路,扩展输入电压的电压基准电路,扩展输出电流的电压基准电路,负电压基准电路,正负电压基准电路,调节外部基准电压改变 $\Sigma - \Delta$ ADC 的增益,通过调节电压基准来增加 ADC 的精度和分辨率,以及多 ADC 系统的基准电压设计。

第 5 章模数混合系统的 PCB 设计,介绍了模数混合电路 PCB 的分区,模数混合电路的接地和电源去耦合,运算放大器的 PCB 设计,12 位称重系统的 PCB 设计,24 位 $\Delta - \Sigma$ ADC 的 PCB 设计,模数混合系统 PICtail™ 演示板的 PCB 设计,多通道同时采样数据采集系统的 PCB

设计,以及 16 位 DAC 的 PCB 设计。

第 6 章 模拟前端(AFE),介绍了应变仪、温度、pH 化学传感器等传感器模拟前端,用于电容传感器接口的模拟前端,ECG/EKG 模拟前端,超声模拟前端,用于数字化 X 射线探测器的模拟前端,电测量模拟前端,通信模拟前端,以及数据采集系统的电路和 PCB 设计。

本书在编写过程中,参考了大量的国内外著作和资料,参考并引用了 Texas Instruments、Analog Devices、Maxim、Microchip Technology、Linear Technology、National Semiconductor 等公司提供的技术资料和应用笔记,得到了许多专家和学者的大力支持,听取了多方面的意见和建议。李富英高级工程师对本书进行了审阅,参与本书编写的还有南华大学李月华老师、王彦教授、李圣副教授、李扬宗、肖志刚、刘聪、汤柯夫、樊亮、张翼、李军、戴焕昌、税梦玲、欧科军、李富英等,在此一并表示衷心的感谢。

同时感谢“国家级大学生创新创业训练计划项目”(201210555009)课题组,湖南省普通高等院校教学改革研究项目(20120216)和(20130216)课题组,湖南省大学生研究性学习与创新性实验计划项目(201209)课题组,对本书编写所做的大量工作和支持。

由于我们水平有限,不足之处在所难免,敬请各位读者批评斧正。

黄智伟 于南华大学

2013 年 11 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

第 1 章 模数转换器 (ADC) 的驱动电路设计	1
1.1 影响 ADC 精度的一些技术指标	1
1.1.1 选择 ADC 时需要考虑的一些因素	1
1.1.2 ADC 的转换函数	4
1.1.3 ADC 的偏置误差	5
1.1.4 ADC 的增益误差	6
1.1.5 ADC 的微分非线性误差	7
1.1.6 ADC 的积分非线性误差	7
1.1.7 ADC 的绝对精度误差	8
1.1.8 ADC 的孔径误差	8
1.1.9 ADC 的量化误差	9
1.1.10 ADC 的动态指标	10
1.1.11 系统精度和分辨率	13
1.2 为 ADC 选择合适的驱动缓冲器	14
1.2.1 噪声对 ADC 性能的影响	14
1.2.2 总谐波失真加噪声 (THD + N)	20
1.2.3 带宽	21
1.2.4 压摆率和建立时间	23
1.2.5 缓冲器性能与 ADC 的输入结构	25
1.3 放大器电路设计中应注意避免的一些问题	27
1.3.1 正确地为 AC 耦合提供 DC 偏置电流回路	27
1.3.2 正确地为放大器和 ADC 提供参考电压	29
1.3.3 注意片上输入保护二极管带来的问题	33
1.3.4 运算放大器的接地点选择	33
1.3.5 运算放大器的屏蔽	36
1.4 单电源运算放大器电路设计应考虑的问题	38
1.4.1 输入级和输出级	38
1.4.2 失调电压 (V_{OS}) 和输入偏置电流 (I_B)	39
1.4.3 增益与负载的关系	41
1.4.4 摆率、开环增益与输出摆幅	41
1.4.5 噪声	42
1.4.6 失真	43

1.4.7	为单电源运算放大器电路提供退耦	44
1.4.8	为单电源运算放大器电路提供负电源	45
1.5	基于运算放大器的 ADC 驱动电路	46
1.5.1	转换 ADC 的输入电压范围	46
1.5.2	双极性 SAR ADC 的低失真直流耦合驱动	47
1.5.3	16 位 ADC 单端输入驱动电路	47
1.5.4	12 位 ADC 单端输入驱动电路	48
1.5.5	单端输入、差分输出 ADC 驱动电路	49
1.5.6	差分输入、差分输出 ADC 驱动电路	49
1.5.7	多通道 16 位逐次逼近型 ADC 驱动电路	51
1.5.8	增益可编程 ADC 驱动电路	52
1.6	基于仪表放大器的 ADC 驱动电路	53
1.6.1	仪表放大器电路与 ADC 的匹配	53
1.6.2	带宽为 3.4MHz 的高速 ADC 驱动电路	54
1.6.3	16 位 3Msps PULSAR [®] ADC 驱动电路	54
1.6.4	微控制器内部 ADC 的驱动电路	56
1.6.5	改进仪表放大器的差分输出电路	56
1.6.6	高速、高共模抑制比精密模拟前端电路	58
1.6.7	高阻抗、高 CMR、 $\pm 10V$ 模拟前端电路	59
1.6.8	适合宽动态范围信号调理的 4 通道模拟前端电路	61
1.7	高速差分 ADC 驱动器	64
1.7.1	差分信号的特点	64
1.7.2	全差分电压反馈 ADC 驱动器电路	65
1.7.3	差分放大器电路的增益	65
1.7.4	差分输入的匹配电阻	66
1.7.5	单端输入的匹配电阻	66
1.7.6	输入耦合	68
1.7.7	输出耦合	69
1.7.8	差分 ADC 驱动器的噪声	69
1.7.9	电源电压选择与处理	69
1.7.10	注意差分 ADC 驱动器数据手册中的一些参数	70
1.8	基于差分放大器的 ADC 驱动电路	74
1.8.1	单端到差分的 12 位 40Msps ADC 驱动电路	74
1.8.2	3V 单电源单端输入、差分输出 ADC 驱动电路	76
1.8.3	单端输入、差分输出 ADC 驱动电路	77
1.8.4	单端至差分双通道 12 位 3Msps SAR ADC 驱动电路	78
1.8.5	单端至差分的轨到轨输出 ADC 驱动电路	79

1.8.6	单端输入、差分输出 14 位 ADC 驱动电路	80
1.8.7	单端输入、差分输出 16 位 ADC 驱动电路	81
1.8.8	单端输入、差分输出 105Msps ADC 驱动电路	82
1.8.9	DC 耦合单端到差分 ADC 驱动电路	83
1.8.10	单端输入、差分输出增益可选的差分 ADC 驱动电路	84
1.8.11	单端输入、差分输出交流耦合 IF ADC 驱动电路	85
1.8.12	单端输入、差分输出交流耦合宽带 IF ADC 驱动电路	87
1.8.13	RF/IF 前端差分 ADC 驱动电路	89
1.8.14	双通道 IF 采样接收机的 ADC 驱动电路	90
1.8.15	16 位 140MHz ADC 驱动电路	93
1.8.16	差分输入、差分输出 200MHz IF ADC 驱动电路	94
1.8.17	差分输入、差分输出 75~250MHz IF ADC 驱动电路	96
1.8.18	用 200MHz 变压器来实现单端至差分转换	97
1.8.19	用 800MHz 变压器来实现单端至差分转换	98
1.8.20	ADC 驱动变压器二次侧的阻抗匹配	98
1.8.21	单端输入、差分输出 750MHz ADC 驱动电路	100
1.8.22	采用集成宽带有源滤波器的 ADC 驱动电路	101
1.9	ADC 输入采样/保持电路	104
1.9.1	影响采样/保持电路的技术参数	104
1.9.2	采样时间为 700ns 的 ADC 输入采样/保持电路	106
1.9.3	采样时间为 250ns 的 ADC 输入采样/保持电路	108
1.9.4	隔离的多通道 ADC 前端电路	109
第 2 章	数模转换器 (DAC) 的输出电路设计	112
2.1	影响 DAC 精度的一些技术指标	112
2.1.1	DAC 的转换函数	112
2.1.2	DAC 的偏置误差	113
2.1.3	DAC 的增益误差	113
2.1.4	DAC 的微分非线性误差	114
2.1.5	DAC 的积分非线性误差	114
2.1.6	DAC 的绝对精度误差	115
2.2	DAC 的输出电路	115
2.2.1	转换 DAC 电流输出为电压输出的电路	115
2.2.2	DAC 的双极性电压输出电路	116
2.2.3	单极性 DAC 的输出电路	118
2.2.4	电压输出 DAC 的输出电路	118
2.2.5	电流输出 DAC 的输出电路	119
2.2.6	视频 DAC 输出电路	120

2.2.7	视频 DAC 输出缓冲电路	121
2.2.8	具有采样/保持电路的 4 通道 DAC 输出电路	122
2.2.9	具有采样/保持电路的 8 通道 DAC 输出电路	122
2.2.10	隔离的 DAC 输出电路	124
2.2.11	高速电流输出 DAC 的缓冲器电路	125
第 3 章	抗混叠滤波器电路设计	129
3.1	抗混叠滤波器	129
3.1.1	混叠现象的产生	129
3.1.2	低通滤波器的频域特性	131
3.1.3	混叠频率计算	133
3.1.4	低通滤波器的设计工具	134
3.2	OP 构成的抗混叠滤波器电路	135
3.2.1	1Hz 4 阶低通滤波器电路	135
3.2.2	5 阶 1kHz 低通 Bessel 滤波器电路	136
3.2.3	Butterworth 低通滤波器电路	137
3.2.4	5 阶 100kHz Chebyshev 低通滤波器电路	138
3.2.5	RTD 温度传感器的低通滤波电路	138
3.2.6	多路输入的低通滤波电路	139
3.3	集成的抗混叠滤波器电路	140
3.3.1	4 阶 Butterworth 滤波器	140
3.3.2	数字可编程双路 2 阶连续时间方式低通滤波器	141
3.3.3	5 阶低通开关电容滤波器	142
3.3.4	8 阶低通开关电容滤波器	143
3.3.5	8 阶低通 Elliptic 开关电容滤波器	144
3.3.6	可配置的滤波器和 ADC 驱动电路	144
3.3.7	UHF RFID 阅读器的双基带 ADC 滤波电路	146
3.3.8	双 2 阶 10MHz 低通滤波器	147
第 4 章	电压基准电路设计	148
4.1	电压基准的选择	148
4.1.1	选择电压基准源的一些考虑	148
4.1.2	齐纳基准源	150
4.1.3	带隙基准源	152
4.1.4	XFET 基准源	152
4.1.5	串联型电压基准	153
4.1.6	并联型电压基准	154
4.1.7	串联型或并联型电压基准的选择	155
4.2	单片电压基准电路	156

4.2.1	超低噪声 XFET 基准电压源	156
4.2.2	超低噪声 LDO XFET 基准电压源	157
4.2.3	2.5V 电压基准	158
4.2.4	1.25V/2.048V/2.5V/3V/3.3V/4.096V/5V 电压基准	158
4.2.5	5V 电压基准电路	158
4.2.6	高输出电流的电压基准电路	159
4.2.7	采用基准电压源和运算放大器构成的电压基准电路	159
4.2.8	24 位 ADC 的基准电压电路	160
4.2.9	电压输出 DAC 的电压基准电路	161
4.2.10	精密 DAC 电压基准电路	162
4.2.11	ADC 和 DCA 电压基准电路	162
4.3	输出电压可调的电压基准电路	162
4.3.1	可编程输出电压的电压基准电路	162
4.3.2	可数字调节输出电压的电压基准电路	163
4.3.3	可开关控制的电压基准电路	165
4.4	扩展输入电压的电压基准电路	166
4.4.1	3.6~40V 输入电压的电压基准电路	166
4.4.2	4~30V 输入电压的电压基准电路	166
4.4.3	6~80V 输入电压的电压基准电路	167
4.4.4	6~160V 输入电压的电压基准电路	167
4.5	扩展输出电流的电压基准电路	168
4.5.1	精密 Boost 输出调节电路	168
4.5.2	扩展输出电流的电压基准电路	168
4.5.3	扩展输出电流到 100mA 的电压基准电路	169
4.5.4	扩展输出电流到 300mA 的电压基准电路	169
4.5.5	扩展输出电流到 50mA 的负电压基准电路	169
4.5.6	扩展输出电流到 100mA 的负电压基准电路	170
4.6	负电压基准电路	170
4.6.1	单片电压基准器件构成的负电压基准电路	170
4.6.2	采用运算放大器的负电压基准电路	171
4.6.3	采用开关电容电压反相器的负电压基准电路	171
4.7	正负电压基准电路	172
4.7.1	$\pm 2.5V$ 基准电压电路	172
4.7.2	$\pm 5V$ 基准电压电路	173
4.8	调节外部基准电压改变 $\Sigma-\Delta$ ADC 的增益	173
4.8.1	MAX149x 系列 $\Sigma-\Delta$ 面板表 ADC	173
4.8.2	电压基准对 ADC 的影响	173

4.8.3	利用分压网络构成可调基准	174
4.8.4	ADC 使用外部基准时的一些考虑	175
4.9	通过调节电压基准来增加 ADC 的精度和分辨率	175
4.9.1	采用多路开关调节电压基准的测量电路	175
4.9.2	基准电压对 ADC 精度和分辨率的影响	177
4.10	多 ADC 系统的基准电压设计	178
4.10.1	多 ADC 系统的基准电压	178
4.10.2	ADC 的精度	178
4.10.3	采用单一外部电压基准	179
4.10.4	采用一组外部电压基准	180
第 5 章	模数混合系统的 PCB 设计	182
5.1	模数混合电路 PCB 的分区	182
5.1.1	PCB 按功能分区	182
5.1.2	分割的隔离与互连	183
5.2	模数混合电路的接地和电源去耦合	184
5.2.1	设计理想的参考面	184
5.2.2	模拟地和数字地分割	186
5.2.3	按电路功能分割接地平面	187
5.2.4	采用“统一地平面”形式	188
5.2.5	数字和模拟电源平面的分割	189
5.2.6	ADC 接地对系统性能的影响	190
5.2.7	模数混合系统的电源和接地布局考虑	192
5.2.8	去耦电容的安装位置	194
5.2.9	最小化去耦电容器和 IC 之间的电流环路	194
5.2.10	去耦电容器与电源引脚端共用一个焊盘	195
5.2.11	采用一个小面积的电源平面来代替电源线条	195
5.2.12	在每个电源引脚端都连接去耦电容器	196
5.2.13	并联使用多个去耦电容器	196
5.2.14	降低去耦电容器的 ESL	199
5.2.15	电源线和地线要布在一起	199
5.3	运算放大器的 PCB 设计	202
5.3.1	放大器输入端保护环设计	202
5.3.2	单端输入、差分输出放大器 PCB 的对称设计	204
5.3.3	高速差分 ADC 驱动器的 PCB 设计	204
5.3.4	差分 ADC 驱动器裸露焊盘的 PCB 设计	206
5.3.5	低失真高速差分 ADC 驱动电路的 PCB 设计	207
5.4	12 位称重系统的 PCB 设计	211

5.4.1	12 位称重系统电路	211
5.4.2	没有采用接地平面的 PCB 设计	212
5.4.3	采用接地平面的 PCB 设计	213
5.4.4	增加抗混叠滤波器	215
5.5	24 位 Δ - Σ ADC 的 PCB 设计	216
5.5.1	如何得到 23 位 RMS 有效分辨率	216
5.5.2	电源层和接地层的布局	216
5.5.3	选择一个合适的外部时钟源	218
5.5.4	推荐使用一个外部基准电压源	219
5.5.5	缩短输入引脚的连线并滤波	219
5.6	模数混合系统 PICtail™ 演示板的 PCB 设计	220
5.7	多通道同时采样数据采集系统的 PCB 设计	224
5.7.1	多通道同时采样数据采集系统简介	224
5.7.2	DAS 的主要噪声和干扰源	225
5.7.3	输入缓冲放大器的选择	227
5.7.4	对输入滤波电路的要求	228
5.7.5	ADC 基准电压选择	229
5.7.6	采用低通滤波器抑制噪声	229
5.7.7	DAS 的 PCB 设计	229
5.8	16 位 DAC 的 PCB 设计	237
5.8.1	16 位 DAC 电路	237
5.8.2	有问题的 PCB 设计	238
5.8.3	改进的 PCB 设计	239
第 6 章 模拟前端 (AFE) 电路设计		241
6.1	传感器模拟前端电路	241
6.1.1	适合应变仪、温度传感器的多通道 24 位传感器模拟前端	241
6.1.2	适合 pH 化学传感器应用的可编程的模拟前端	244
6.1.3	适合 NDIR 应用的传感器模拟前端	245
6.1.4	适合低功耗的化学传感器的可编程的模拟前端	246
6.1.5	适用于体重计和人体成分测量的模拟前端	246
6.2	用于电容传感器接口的模拟前端电路	248
6.2.1	用于电容式传感器的 CapTouch™ 控制器	248
6.2.2	CapTouch 控制器应用中的传感器的设计	249
6.2.3	传感器的响应	252
6.2.4	CapTouch 控制器的布局布线指南	255
6.3	ECG/EKG 模拟前端电路	258
6.3.1	典型的 ECG 设备模拟前端	258

6.3.2	正确选择 ADC 可以降低对 AFE 的要求	260
6.3.3	布局、接地和旁路	262
6.3.4	ADASI000-x 系列 ECG 模拟前端	263
6.4	超声模拟前端电路	268
6.4.1	超声成像系统及主要功能元件的设计考虑	268
6.4.2	基于延时线的 CWD 波束成型超声系统	272
6.4.3	基于混频器的 CWD 波束成型接收机	273
6.4.4	集成的八通道超声接收器 MAX2079	274
6.5	用于数字化 X 射线探测器的 64 通道模拟前端	276
6.6	电测量模拟前端	276
6.6.1	电池测量模拟前端	276
6.6.2	单芯片电表模拟前端	283
6.6.3	单相电表片上系统 (SoC)	284
6.7	通信模拟前端电路	286
6.7.1	电力线通信模拟前端	286
6.7.2	10 位 7.5Msps 超低功耗模拟前端	289
6.7.3	10 位 45Msps 全双工模拟前端	290
6.8	数据采集系统	292
6.8.1	带有 ADC、DAC 的 16 位数据采集系统	292
6.8.2	16 位 1Msps 逐次逼近型模数数据采集系统	292
参考文献		297

第 1 章

模数转换器(ADC)的驱动电路设计

1.1 影响 ADC 精度的一些技术指标

1.1.1 选择 ADC 时需要考虑的一些因素

1. ADC 的分类

常用的 ADC 有积分型、逐次逼近型、并行比较型/串并行比较型/分级型、 Σ - Δ 调制型、电容阵列逐次比较型及压频变换型。

(1) 积分型

积分型 ADC 工作原理是将输入电压转换成时间（脉冲宽度信号）或频率（脉冲频率），然后由定时器/计数器获得数字值。其优点是具有高分辨率，缺点是由于转换精度依赖于积分时间，所以转换速率低，如 TLC7135 等。

(2) 逐次逼近型

逐次逼近型 ADC 由一个比较器和 DAC 通过逐次比较逻辑构成，从 MSB 开始，顺序地对每一位将输入电压与内置 DAC 输出进行比较，经 n 次比较而输出数字值。其优点是速度较高、功耗低，在低分辨率（ <12 位）时价格便宜，但高精度（ >12 位）时价格很高，如 TLC0831 等。

(3) 并行比较型/串并行比较型/分级型

并行比较型 ADC 采用多个比较器，仅作一次比较而实行转换，又称为 Flash（快速）型。由于转换速率极高， n 位的转换需要 $2^n - 1$ 个比较器，所以电路规模极大，价格也高，适用于视频 A/D 转换器等速度特别高的领域。

串并行比较型 ADC 结构上介于并行型和逐次比较型之间，最典型的是由 2 个 $n/2$ 位的并行型 ADC 配合 DAC 组成，用两次比较实行转换，所以称为 Half Flash（半快速）型。还有分成三步或多步来实现 A/D 转换的，叫做分级（Multistep/Subbrangling）型 ADC，而从转换时序角度又可称为流水线（Pipelined）型 ADC。现代的分级型 ADC 中还加入了对多次转换结果作数字运算而修正特性等功能。这类 ADC 速度比逐次比较型高，电路规模比并行型小，如 TLC5510 等。

(4) Σ - Δ 调制型

Σ - Δ 型 ADC 由积分器、比较器、1 位 DAC 和数字滤波器等组成。其原理上近似于积分型，将输入电压转换成时间（脉冲宽度）信号，用数字滤波器处理后得到数字值。因此具有高分辨率，主要用于音频和测量，如 AD7705 等。

（5）电容阵列逐次比较型

电容阵列逐次比较型 ADC 在内置 DAC 中采用电容矩阵方式，也可称为电荷再分配型。一般的电阻阵列 DAC 中多数电阻的值必须一致，在单芯片上生成高精度的电阻并不容易。如果用电容阵列取代电阻阵列，可以用低廉成本制成高精度单片 ADC。最新的逐次比较型 ADC 大多为电容阵列式的。

（6）压频变换型（VFC 型）

压频变换型（Voltage-Frequency Converter, VFC）是通过间接转换方式实现模数转换的。其原理是先将输入的模拟信号转换成频率，然后用计数器将频率转换成数字量。从理论上来说，这种 ADC 的分辨率几乎可以无限增加，只要采样的时间能够满足输出频率分辨率要求的累积脉冲个数的宽度。其优点是分辨率高、功耗低、价格低，但是需要外部计数电路共同完成 A/D 转换，如 AD650 等。

2. ADC 的主要技术指标

（1）分辨率

分辨率是指数字量变化一个最小量时模拟信号的变化量，定义为满刻度与 2^n 的比值。分辨率又称为精度，通常以数字信号的位数来表示。

（2）转换速率

转换速率是指完成一次从模拟转换到数字的 A/D 转换所需的时间的倒数。积分型 ADC 的转换时间是毫秒级，属于低速 ADC；逐次比较型 ADC 是微秒级，属于中速 ADC；全并行/串并行型 ADC 可达到纳秒级。采样时间则是另外一个概念，是指两次转换的间隔。为了保证转换的正确完成，采样速率（Sample Rate）必须小于或等于转换速率。因此有人习惯上将转换速率在数值上等同于采样速率也是可以接受的。转换速率常用单位是 ksp/s 和 Msps，表示每秒采样千/百万次（kilo/Million Samples per Second）。

（3）量化误差

量化误差是指由 A/D 的有限分辨率而引起的误差，即有限分辨率 A/D 的阶梯状转移特性曲线与无限分辨率 A/D（理想 A/D）的转移特性曲线（直线）之间的最大偏差。通常是 1 个或半个最小数字量的模拟变化量，表示为 1LSB 、 $1/2\text{LSB}$ 。

（4）偏移误差

偏移误差是指输入信号为零时输出信号不为零的值，可外接电位器调至最小。

（5）满刻度误差

满刻度误差是指满刻度输出时对应的输入信号与理想输入信号值之差。

（6）线性度

线性度是指实际转换器的转移函数与理想直线的最大偏移，不包括以上三种误差。

其他指标还有绝对精度（Absolute Accuracy）、相对精度（Relative Accuracy）、微分非线性、单调性和无错码、总谐波失真（Total Harmonic Distortion, THD）和积分非线性。

不同类型的 ADC 转换器的结构、转换原理和性能指标方面的差异很大。表 1.1 列出了常用类型的 ADC 的主要特点和应用范围。

表 1.1 常用类型的 ADC 的主要特点和应用范围

类型	逐次逼近型	积分型	并行比较型	分级型	$\Sigma - \Delta$ 型	VFC型
主要特点	速度、精度、价格等综合性性价比高	高精度、低成本、高抗干扰能力	超高速	高速	高分辨率、高精度	低成本、高分辨率
分辨率(位)	8 ~ 16	12 ~ 16	6 ~ 10	8 ~ 16	16 ~ 24	8 ~ 16
转换时间	几~几十 μs	几十~几百 ms	几十 ns	几十~几百 ns	几~几十 ms	几十~几百 ms
采样频率	几十~几百 ksp/s	几~几十 sp/s	几十~几百 Msp/s	几 Msp/s	几十 ksp/s	几~几十 sp/s
价格	中	低	高	高	中	低
主要用途	数据采集 工业控制	数字仪表	超高速视频处理	视频处理 高速数据采集	音频处理 数字仪表	数字仪表 简易 ADC

注: sp/s 为每秒采样次数。

3. ADC 及其相应接口电路选择原则

(1) ADC 的选用依据

目前市场上有许多厂家(如 Analog Devices、Texas Instruments、National Semiconductor、Maxim 等)提供不同结构与性能($\Sigma - \Delta$ 、SAR、流水线及闪速架构, 6 ~ 24 位的分辨率, 直流到 4.3Gsp/s 的采样速率)的 ADC。对于一个模数混合系统, 选择一款合适的模数转换器是件既容易又困难的事。容易是指有各种各样的 ADC 可以选择, 困难是指有各种各样的 ADC 不知道怎样去选择。

选择 ADC 时需要考虑的一些具体问题如下:

- ADC 用于什么系统, 系统(模数混合系统)精度、分辨率的要求是多少;
- 系统工作在动态条件还是静态条件, 带宽要求, 要求 ADC 的转换时间、采样速率如何, 是高速应用还是低速应用;
- 输入的模拟信号类型、特性是什么, 包括模拟输入信号的范围、极性(单、双极性)、信号的驱动能力、信号的变化快慢;
- ADC 输出的数据位数、精度、线性;
- 需要什么样的外界工作条件;
- 系统需要多个通道;
- 是否需要跟踪保持电路;
- 基准电压源的来源, 基准源是外部提供还是由内部提供, 基准电压源的幅度、极性及稳定性, 电压是固定的还是可调的, 由外部提供还是 ADC 芯片内部提供等;
- 对驱动放大器的要求是什么;
- 对数据接口的要求是什么;
- 所要求的数据输出格式是什么;
- 时序条件是什么;
- 电源电压的要求是什么;
- 后续电路对 ADC 输出数字逻辑电平的要求、输出方式(平行、串行或是穿成字的), 是否需数据锁存, 与哪种 CPU 接口或数字电路(三态门逻辑、TTL 还是 CMOS)、驱动电路;