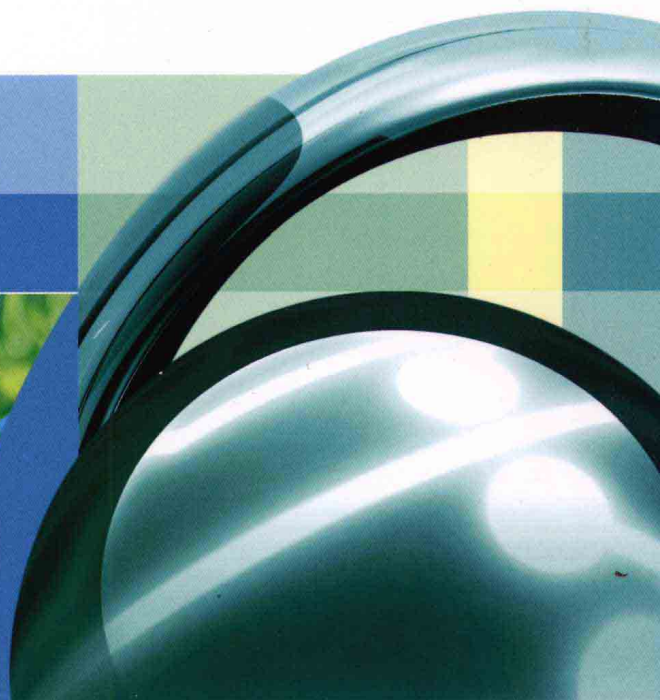
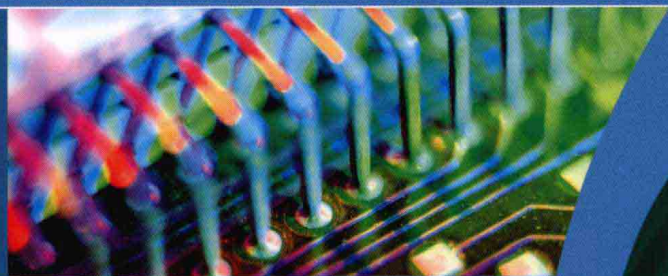




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

基于 EDA的 电子技术课程设计

夏路易 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

基于 EDA 的电子技术课程设计

夏路易 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。电子技术课程设计课是电子技术教学中的重要环节,可以给学生提供一个综合运用所学电子技术知识的机会,为掌握基本的模拟电路与数字电路的设计技术打好基础。

本书的模拟电子技术课程设计部分介绍运放参数与单电源运放、仪表放大器与有源滤波器、传感器基础、传感器信号调理参考电路 Multisim 软件的使用与仿真实例、模拟电路实验板设计基础等。数字电子技术课程设计部分介绍可编程逻辑器件、VHDL 硬件描述语言、Verilog HDL 语言、有限状态机基础、通过例题学习 Max+Plus II 软件、可编程逻辑器件实验电路参考、用 Protel99se 软件画电路板图等。附录中给出了模拟与数字电子技术课程设计题目。

本书可作为高等院校电子技术课程设计的教材,也可以作为高职、高专院校的电子技术课程设计教学用书,还可以是电子技术爱好者学习模拟电路与数字电路的自学用书。

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

基于 EDA 的电子技术课程设计/夏路易编著. —北京:电子工业出版社, 2009.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-07708-1

I. 基… II. 夏… III. 模拟电路—电子技术—课程设计—高等学校—教材 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174077 号

策划编辑:田领红

责任编辑:张燕虹

印 刷:

装 订: 北京牛山世兴印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 21.75 字数: 560 千字

印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 35.00 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 zlts@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

单片机技术、电子技术与对象技术是现代智能技术的基础。通常，人们将利用这三种技术设计的电子系统称为嵌入式系统。

单片机技术、电子技术与对象技术是嵌入式技术的三大支柱。单片机是用引脚控制对象的，而电子元件是单片机引脚与对象之间的连接桥梁。

在教学中，单片机、电子技术、对象技术的教材与教学是分开的，其缺点是不能满足嵌入式系统设计的需求。因此，将单片机、电子技术与对象技术融会贯通是教学改革的发展方向。

电子技术课程设计是电子技术教学中的重要环节，它可以给学生提供一个综合运用所学电子技术知识的机会，为掌握基本的模拟电路与数字电路的设计技术打好基础。

本书的前半部分为模拟电子技术课程设计部分，设计内容以运放电路为主，对象为传感器，结合传感器与放大器技术，完成嵌入式系统中的模拟前端电路设计。该部分内容包括运放参数与单电源运放、仪表放大器与有源滤波器、传感器基础、传感器信号调理参考电路、Multisim 软件的使用与仿真实例、模拟电路实验板设计基础等。将内容集中在传感器与传感器放大电路，是因为这些电路是嵌入式系统中检测实际物理量所必需的。

本书的后半部分是数字电子技术课程设计部分，设计内容以可编程逻辑器件、硬件描述语言为主，对象为各种简单控制对象，用状态机实现对象控制算法。该部分内容包括可编程逻辑器件、VHDL 硬件描述语言、Verilog HDL 语言、有限状态机基础、通过例题学习 Max+Plus II 软件、可编程逻辑器件实验电路参考、用 Protel99se 软件画电路板图等。

本书附录给出了若干模拟电路与数字电路课程设计题目。完成这些题目不仅可以学习实际的设计过程，更主要是通过课程设计学会阅读电子元件数据手册，读懂已有的电路图，看懂他人所写的硬件描述语言程序。

本书讲述的电子技术课程内容为嵌入式系统设计所必需的，是智能电子产品开发的基础。例如，在一个智能控制器中需要检测力、温度等物理量，这就需要运放放大弱信号。如果需要实现单片机与存储器、AD 转换等外围电路的快速接口，就需要采用可编程逻辑器件实现接口电路。

本书具有如下特点：

(1) 内容集中在实际中所迫切需要的传感器信号放大技术与基于可编程逻辑器件的数字系统设计上。

(2) 模拟电子技术课程设计部分的内容不仅介绍了目前实际中需要的单电源运放、仪表放大器，还介绍了相关的传感器。

(3) 数字电子技术课程设计部分不仅介绍了基本数字系统设计的可编程逻辑器件与硬件描述语言，还重点介绍了状态机设计。

(4) 模拟电路设计仿真采用 Multisim 软件，数字系统设计仿真采用 Max+Plus II 软件或 Quartus II 软件。这些软件在各学校中使用广泛，很多教师都已经掌握了这些软件的使用。

(5) 模拟电子技术课程设计与数字电子技术课程设计题目, 可基本满足一个教学班每人一题的要求。

(6) 介绍了如何使用 Protel99se 软件设计模拟与数字电路板。

本书适合作为电子技术课程设计的教材, 具体教学安排如下:

对于 1 周学时的模拟或数字课程设计, 需要 12 小时的授课、12 小时的设计、16 小时的仿真与实际实验。

对于 1 周以上的模拟与数字课程设计, 可以适当增加讲课内容与实际实验内容。

本书可作为高等院校电子技术课程设计的教材, 也可以作为高职、高专院校的电子技术课程设计教学用书, 还可以是电子技术工程师的参考书与电子技术爱好者学习模拟与数字电路的自学用书。

参加本书编写工作的有太原理工大学田建艳(第 2 章、第 3 章、第 11 章)、韩晓明(第 4 章)、谢珺(第 13 章), 太原大学李莉(第 6 章), 太原科技大学电子信息工程学院何秋生(第 9 章)、太原电力高等专科学校宋强(第 10 章), 其余章节与附录由夏路易编写。全书由夏路易统稿。

为了便于读者学习和使用实际的 Multisim 软件, 对本书某些电路图中不符合国家标准的图形及符号等未做改动(例如, 出于软件原因, μF 为 uF)。

本书在编写过程中, 参阅了许多专家的教材、著作、论文以及微芯(Microchip)、德州仪器(Texas Instrument)、ADI(Analog Devices)等公司网站提供的资料, 在此表示感谢。

由于作者能力有限, 书中难免有错漏之处, 敬请同行、师生和读者批评指正, 在此表示感谢。

夏路易

目 录

第 1 章 模拟电子技术课程设计概论	1
1.1 模拟电路分析方法	1
1.2 模拟电路设计介绍	2
1.3 ADC 前端电路简介	3
第 2 章 运放参数与单电源运放	6
2.1 运放直流参数介绍	6
2.2 运放交流参数介绍	11
2.3 单电源运放的工作原理	12
2.4 运放电路的直线方程设计法	17
2.5 常用单电源运放芯片	19
2.6 单电源运放的使用说明	22
第 3 章 仪表放大器与有源滤波器	23
3.1 仪表放大器简介	23
3.2 仪表放大器的基本工作原理	24
3.3 集成仪表放大器	27
3.4 有源滤波电路	32
第 4 章 传感器基础	37
4.1 传感器的基础知识	37
4.2 电阻式传感器	38
4.3 热电偶	43
4.4 集成温度传感器	44
4.5 传感器调理电路介绍	46
4.6 传感器激励电路介绍	49
第 5 章 传感器信号调理参考电路	53
【参考电路 1】 基于仪表放大器 AD623 的铂热电阻 Pt100 电路 (1)	53
【参考电路 2】 基于仪表放大器 AD623 的铂热电阻 Pt100 电路 (2)	53
【参考电路 3】 基于仪表放大器 AD620 的传感器放大电路 (1)	53
【参考电路 4】 基于仪表放大器 AD620 的传感器放大电路 (2)	54
【参考电路 5】 具有有源滤波器的 Pt100 热电阻电路	56
【参考电路 6】 具有有源滤波器的电桥称重传感器电路	57

【参考电路 7】	基于运放 INA114 的 350 Ω 电桥信号放大电路	59
【参考电路 8】	基于三运放仪表放大器的 350 Ω 电桥电路	60
【参考电路 9】	热敏电阻测温放大电路	60
【参考电路 10】	利用二极管测温的放大电路	62
【参考电路 11】	单电源精密整流电路	63
【参考电路 12】	不使用整流二极管的单电源精密整流电路	64
【参考电路 13】	单电源交流信号电平移位电路	64
【参考电路 14】	将 1~5V 的输入电压信号转换为 4~20mA 的电流输出电路	65
【参考电路 15】	基于 INA326 的热电阻放大电路	66
【参考电路 16】	基于 INA326 的应变电阻电桥放大电路	66
【参考电路 17】	采用三运放仪表放大器的热电偶信号放大电路	67
【参考电路 18】	温度控制电路中的误差信号放大电路	67
【参考电路 19】	K 型热电偶测温信号放大电路	67
第 6 章	Multisim 软件的使用与仿真实例	69
6.1	窗口、菜单与工具按钮	69
6.2	元件与元件参数设置	73
6.3	实验仪器	76
6.4	分析方法	80
6.5	使用 Multisim 2001 中的电子仪器的实例	88
6.6	使用 Multisim 2001 中的分析方法的实例	90
6.7	使用 Multisim 软件仿真的实例	93
第 7 章	模拟电路实验板设计基础	107
7.1	电路板设计基础	107
7.2	具有运放电路的 PCB 设计	109
7.3	热电阻测温装置布局方案实例	113
7.4	实验电路板设计实例	115
第 8 章	数字系统设计概述	117
8.1	数字系统概述	117
8.2	硬件描述语言简介	119
8.3	实现数字系统设计的硬件	120
8.4	数字系统课程设计	121
第 9 章	可编程逻辑器件	122
9.1	现场可编程门阵列	122
9.2	复杂可编程逻辑器件	128
9.3	其他可编程逻辑器件介绍	134
9.4	Altera 公司可编程逻辑器件的配置与编程	134

第 10 章 VHDL 硬件描述语言	139
10.1 用 VHDL 语言设计数字电路的流程	139
10.2 VHDL 程序结构	139
10.3 信号、变量和常数的数据类型	142
10.4 VHDL 中的运算符	145
10.5 函数	146
10.6 库和包	147
10.7 信号赋值语句	148
10.8 进程	150
10.9 用 VHDL 语言描述组合电路	152
10.10 用 VHDL 语言描述时序电路	154
10.11 元件描述与调用	158
10.12 常用数字电路的 VHDL 语言描述	159
10.13 编程注意事项	168
第 11 章 Verilog HDL 语言	170
11.1 Verilog HDL 语言的基本结构	170
11.2 Verilog HDL 语言基础	172
11.3 Verilog HDL 语言的数据流描述	179
11.4 Verilog HDL 语言的行为描述	180
11.5 Verilog HDL 语言中的分支语句	186
11.6 Verilog HDL 语言中的门级描述	188
11.7 Verilog HDL 语言中的结构描述	189
11.8 Verilog HDL 语言中的其他语句	191
11.9 基于 Verilog HDL 语言的组合逻辑电路设计	192
11.10 基于 Verilog HDL 语言的时序电路设计	193
11.11 Verilog HDL 语言描述例子	195
11.12 Max+Plus II 软件对 Verilog HDL 语言的支持	202
第 12 章 有限状态机基础	205
12.1 有限状态机	205
12.2 状态表	213
12.3 状态图	215
12.4 使用 VHDL 语言描述状态机	225
12.5 基于 Verilog HDL 语言的状态机描述	238
12.6 使用 Verilog HDL 语言实现梯形图	257
第 13 章 通过例题学习 Max+Plus II 软件	268
13.1 使用图形输入法设计数字系统	268

13.2	VHDL 语言输入法	275
13.3	使用 VHDL 语言设计数字系统	276
13.4	使用 Verilog HDL 语言设计数字系统	282
第 14 章	可编程逻辑器件实验电路参考	287
14.1	最小芯片电路	287
14.2	与前述最小芯片电路配套的外围电路图	289
14.3	下载电缆电路	291
14.4	设计实验电路板时需要考虑的问题	291
第 15 章	用 Protel99se 软件画电路板图	293
15.1	Protel99se 软件介绍	293
15.2	设计模拟实验电路板	296
15.3	基于 EPM240 的实验板设计	304
15.4	用 Protel99se 画图的注意事项	311
15.5	贴片元件焊接技术	312
附录 A	模拟电子技术课程设计题目	313
A1	模拟电路设计步骤、说明书与设计小组	313
A2	模拟课程设计题目	313
附录 B	数字电子技术课程设计题目	320
B1	数字系统设计步骤、设计说明书与设计小组	320
B2	数字电子技术课程设计题目	321
附录 C	Quartus II 软件的使用	327
C1	项目、文件、顶层文件、底层文件和逻辑符号之间的关系	327
C2	图形输入法设计步骤	327
C3	菜单模式转换	336
C4	采用 VHDL 语言设计	336

第1章 模拟电子技术课程设计概论

在嵌入式系统中,电子技术是广泛服务于单片机与被控制对象之间的技术,因此电子技术是电类专业的专业基础课,只有通过该课程的学习,才能具有设计模拟、数字电路的能力。要想学好这门课程,除了学习该课程的基础内容外,还应该知道如何实际使用电子元器件设计电子产品。只有掌握理论和实践两方面的知识,才能成为一个电子系统的设计工程师。

在模拟电子技术课程中,分章节介绍了元器件、基本放大器、频率特性、功率放大器、运算放大器、反馈放大器、信号源和直流电源。虽然内容很广,但都是以分析为主,尤其以手工分析为主。通过分析,使读者明白各类电路的工作原理,这是使用元器件与电路设计的基础。

会分析已有的电路是很重要的,但设计出可用的实际电路更重要,因为只有设计出电路,才能使分析电路、设计电路的能力转换成劳动成果。

模拟电路设计过程可以使设计人员具有如下能力:

- (1) 看懂电路图。
- (2) 看懂元器件数据表。
- (3) 选择合理的电路结构,估算电路参数。
- (4) 使用仿真软件分析、验证所设计电路的正确性。
- (5) 设计电路板,调试电路板。

1.1 模拟电路分析方法

1. 分析方法的进步

模拟电路课程教科书中对模拟电路的分析是以手工计算为主,但是在实际设计中,却是以计算机软件支持下的分析方法为主。现在有大量的计算机模拟电路分析软件,这些软件具有多种分析方法,可以快速计算出各种电路参数,并能够仿真实际的模拟电路运行,这是分析方法的一个进步。**Multisim** 软件是非常优秀的电路分析软件,该软件有很多分析功能,利用这些功能可以对电路进行各种分析。

虽然计算机软件支持下的电路分析方法非常先进,但是要正确使用这些分析方法,还需要掌握大量的模拟电路基础知识。这些知识来源于教科书,对这些知识的掌握有助于计算机分析方法的使用。

掌握计算机软件分析方法很重要,不需要纸和笔,而且节省时间,在计算机屏幕上,就可以将模拟电路功能了解清楚。要想作为一个模拟电路设计者,必须学会计算机软件分析方法,才能在未做出实际电路之前,通过分析知道被设计电路的参数和性能,使设计简单、快速和准确。

现在,能够分析电路的软件有很多,除了 **Multisim** 软件之外,还有 **Pspice**、**Tina Pro** 等很多软件。这些软件都能够分析和仿真模拟电路。

学会电路分析软件的使用并不难,难的是正确分析模拟电路,使计算机给出正确的分

析结果；而能够理解这些分析结果是更难的一件事，只有正确地理解分析结果，分析才会有意义。

使用计算机软件分析模拟电路可以达到事半功倍的效果。对于难以理解的电路，可以通过分析得以理解；对于设计完成的电路，可以通过分析来验证电路参数和技术指标的准确性。掌握了计算机软件分析电路的方法，就掌握了模拟电路分析、设计的主动权。

1.2 模拟电路设计介绍

1. 模拟电路设计步骤

模拟电路设计，给人的印象是无方法可循，因为电路种类太多了，电阻、电容、晶体管、运放等元器件只要适当组合，就（像七巧板可以组成各种图案一样）可以组合成各种功能的电路，但是很少有教科书介绍为什么要这样或那样组合，只是介绍组合后的电路中的元件参数和技术指标。

将元器件组合成电路，就是设计电路，设计电路是分析电路的逆过程，分析的结果可能是一个，但是设计电路的结果可能是多个，这是设计电路的特点。

其实，只要把元器件组成电路，而电路功能满足要求，就是设计。设计模拟电路步骤如下。

1) 选择电路结构与参数

各种各样的电路结构很多，为什么选择这样的结构，这是设计者首先遇到的问题。一般来说，参考别人的选择或按照别人的资料进行选择都是常见的方法。可以通过教科书、互联网查阅大量资料，或拆开现有的产品，获取为什么要用这样电路结构的信息。这样做的好处是，只要找到资料，就能为自己的设计提供数据，可以加快设计进程。对于集成运放加外围元器件的现代电路构成方法，最好是以运放厂商的网站获得与运放有关的资料、外围元器件搭配原理图，这也是找到合适电路结构的捷径。

经常遇到的情况是，所参考的电路不能全部满足所设计电路的功能，需要修改结构与参数，直到满足需求。实际上，选择、计算获得的电路参数都是初步参数，只有通过实验才能得到最后的参数。

总之，电路结构的选择没有一定的规律，需要有分析电路的基础、经验及资料。

2) 在计算机软件支持下的模拟电路设计

计算机软件分析电路的能力很强，可以在电路结构和元件参数选择过程中验证电路结构和元件参数的正确性。可以说，被设计电路的计算机软件分析与仿真是设计电路中的一个重要环节，只要有可能，就应该对电路各个部分进行验证。虽然验证正确的电路未必能够实际实现，但验证结果不正确的电路一般都无法实现。

3) 设计、调试实验电路板

该步骤是重要的一步。选择好电路参数后，应该用电路板画图软件（如 Protel99se）画出电路原理图，然后画成电路板后，送交电路板制作公司做出电路板，最后安装元件，进行样板实验，直到电路功能实现后，才能最终确定电路结构与参数。如果电路很简单，也可以用焊盘板或面包板进行实验。

2. 模拟电路课程的设计内容

在数字信号处理能力越来越强的今天，模拟电路的应用范围越来越小，以致在很多电子

技术课程设计教材中, 模拟电路设计的内容很少。实际上, 在传感器调理电路中, 一直都采用运放电路实现信号放大与变换。随着模数转换器(ADC)位数的增加, 对运放电路的设计要求也越来越高。采用与传感器相关的运放电路设计作为模拟电子技术课程设计的主要内容, 应该是一个很好的选择。在很多工业控制、汽车、家用电器等智能产品中, 都需要传感器, 因此需要对传感器放大电路(又称为传感器信号调理电路)进行设计。

模拟电子技术课程设计, 应该实际设计一个传感器放大电路, 并且实现该电路, 完成一个模拟电路的设计全过程。在设计过程中, 学习运放芯片的选择、电路参数的选择、EDA软件的使用、电路板设计、电路调试等内容, 为随后的电子产品模拟电路部分设计打好基础。

应该学会从世界各运放产品生产公司寻找参数合适的运放芯片, 并能看懂相关的资料。

应该学会搜索各种运放电路, 看懂这些电路, 通过修改其结构与参数, 为己所用。

应该学会用 Multisim 等软件仿真所设计的电路, 分析所设计电路的结构与参数的合理性。

应该学会用电路板画图软件 Protel99se 设计模拟电路电路板, 并知道如何进行抗干扰设计。

应该学会实际电路焊接、调试与测量技术。

3: 模拟电路课程设计是重要的教学环节

模拟电路课程设计是电类专业的一个重要教学环节, 通过该教学环节, 可以了解模拟电路的设计过程, 具有初步设计能力, 为电子产品的研发和成为电子技术设计工程师打好基础。电子技术课程设计的特点是, 综合运用在模拟电子技术课程中学到的知识, 设计模拟电路, 虽然已经学过所设计电路的分析方法, 但分析毕竟与设计不同, 电子技术课程设计就是学习设计方法, 而这些方法在产品设计中将得到应用。

1.3 ADC 前端电路简介

ADC 前端电路的主要功能是调理传感器信号, 将弱信号放大到 ADC 能够接收的输入范围。ADC 前端电路示意图如图 1-1 所示。

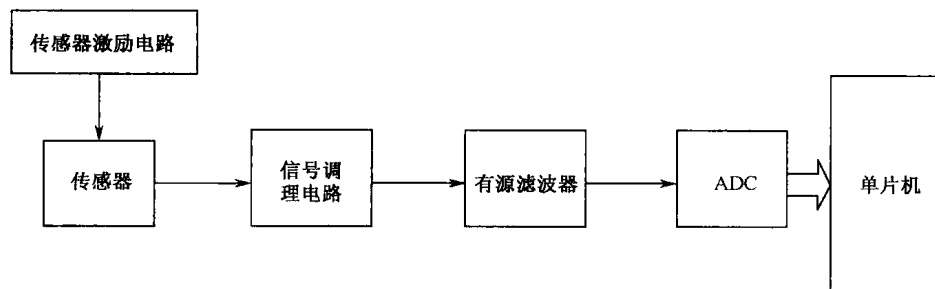


图 1-1 ADC 前端电路示意图

下面分别介绍图中各环节的功能与特性。

1. 传感器

传感器由敏感元件与相关电路组成, 用于检测非电物理量, 并将非电物理量转换为电量信号输入到运放电路。

2. 传感器激励电路

传感器激励电路用于向传感器提供电源, 例如, 传感器电路是电桥, 则向电桥提供稳定的电压源或电流源; 而对于热敏电阻传感器, 则需要稳定电流源使电阻转换成电压。

3. 信号调理电路

信号调理电路的功能为弱信号放大与电平移位, 目的是使放大器正常工作, 使信号满足 ADC 输入的需求。

信号调理电路的输入需要保护, 以避免静电 (ESD)、过电压和过电流, 特别是在长线传感器的情况下, 更需要静电 (ESD)、过电压和过电流保护。

4. 有源滤波器

滤波电路可以改善信号质量, 以满足 ADC 精度的需求。在大部分情况下, 使用无源 RC 滤波器就足够了, 但在某些情况下, 需要有源滤波电路消除 ADC 采样时出现的混叠频率噪声, 使 ADC 转换出的数值更准确。

滤波器设计需要使用滤波器设计软件, Microchip 公司提供免费的滤波器设计软件 FilterLAB。除了模拟信号滤波外, 还需要在单片机中实现数字滤波, 以滤掉 ADC 转换过程中出现的噪声。

5. ADC (模数转换器)

ADC 将模拟信号转换成数字信号, 然后送到单片机中进行数据处理。

ADC 的输入为信号调理电路的输出, 也就是传感器检测的物理信号。

ADC 将模拟量转换为数字量的位数, 称为 ADC 的位数。

在参考电压的支持下, 模拟量转换为数字量输出, ADC 的分辨率与 ADC 的位数有关。例如, 对于参考电压为 5V, 10 位 ADC 的分辨率 (每个数字代表的电压值) 为 $5V/(2^{10}-1)=4.887\text{mV}$, 而 12 位 ADC 的分辨率为 $5V/(2^{12}-1)=1.221\text{mV}$ 。

ADC 的误差, 就是 ADC 输出的数字与输入模拟信号值之差, 通常有微分误差、积分误差、非线性误差、偏移误差等。

ADC 工作需要稳定的参考电源 V_{REF} , 对于 10 位 ADC, 其参考电源、输出数字量 D 与输入模拟量 V_i 之间的关系为:

$$V_i = \frac{V_{\text{REF}}}{2^{10}} D$$

通常, 要求参考电压 V_{REF} 很稳定, 不随温度变化。例如, 压力传感器测量力的范围为 200kg, 传感器输出信号为 0~20mV, 信号调理电路的放大倍数为 250 倍, ADC 输入信号范围为 0~5V, 采用 10 位 ADC, 则有如表 1-1 所示的标度变换表。

表 1-1 标度变换表

	传 感 器	信号调理电路	ADC
输出	0~20mV	0~5V	0~1023
输入	0~200kg	0~20mV	0~5V

可以得到每个数字代表 0.1955kg (0.1955kg/bit) 或 5.1bit/kg。

如果传感器、信号调理放大器与 ADC 的增益都很稳定, 则转换就很准确。但是, 通常

增益是温度的函数，因此增益误差可以引起转换误差，ADC 的增益与参考电压 V_{REF} 有关，ADC 的参考电压不应随温度变化。

6. 单片机

单片机是将 CPU（微处理器）、RAM/Flash 存储器、I/O 接口和各种外围模块集成在一块芯片上的单片微型计算机，简称为单片机。在其他国家，又称单片机为微控制器（MCU）。单片机广泛应用在军事、工业、民用等各个领域，使当今社会进入智能化时代，每时每刻都有大量基于单片机的产品被设计出来，满足社会各方面的需求。单片机结构框图如图 1-2 所示。

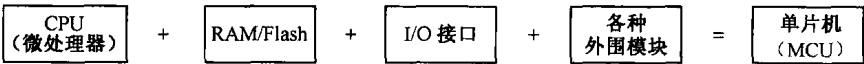


图 1-2 单片机结构框图

单片机具有数学处理能力，因此在单片机中可以采用数字滤波算法消除 ADC 转换中生成的噪声，同时还可以采用计算多项式或查表的方法校正传感器的误差，修正传感器的非线性。

单片机可以实现很多功能，如传感器断线检测、超限报警、标度转换等。

传感器、单片机与通信接口集成在一起，就是智能传感器。

传感器、单片机与执行机构集成在一起，就是智能控制器。

单片机与种类繁多的控制对象一起，组成各种各样的嵌入式系统，改变着人们的生活，而电子技术就是联系单片机与控制对象之间的纽带。

第2章 运放参数与单电源运放

本章介绍实际的运放参数与单电源运放，目的是使初学者能够读懂运放数据手册，并能正确使用运放，特别是使用单电源运放。

2.1 运放直流参数介绍

在 ADC 前端电路中，传感器激励、信号放大、有源滤波等各个模拟量环节都与运放有关。

1. 理想运放

在模拟电路教科书中，理想运放如图 2-1 所示。其中， V_{IN-} 为反相输入， V_{IN+} 为同相输入， V_{OUT} 为输出，电源 V_{DD} 、 V_{SS} 也常用 V_{CC} 、 V_{EE} 表示。

理想运放具有如下特点。

1) 输入部分

- (1) 输入偏置电流 $I_B=0$ 。
- (2) 输入阻抗 $Z_{IN}=\infty$ 。
- (3) 输入电压范围 V_{IN} 没有限制。
- (4) 没有输入噪声电压与电流。
- (5) 输入失调电压 $V_{OS}=0$ 。
- (6) 共模抑制比 $CMRR=\infty$ 。

2) 电源部分

- (1) V_{DD} 与 V_{SS} 永远满足需求。
- (2) 电源电流 $I_{SUPPLY}=0$ 。
- (3) 电源电压抑制比 $PSRR=\infty$ 。

3) 放大部分

- (1) 开环增益 $A_{OL}=\infty$ 。
- (2) 带宽 $BW=0\sim\infty$ 。
- (3) 谐波变形 $THD=0$ 。

4) 输出部分

- (1) $V_{OUT}=V_{SS}\sim V_{DD}$ 。
- (2) 转换速率 $SR=\infty$ 。
- (3) 输出阻抗 $Z_O=0$ 。
- (4) 输出电流 I_O 满足负载需要。

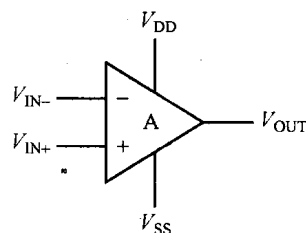


图 2-1 理想运放

实际上，由于半导体器件的工作原理、材料、工艺等因素的影响，所以没有理想运放。要想了解真正的运放，应该理解运放参数。不同公司生产的运放都有参数说明，但是，这些参数说明都有区别，因此需要理解运放参数的意义，并综合参数测试条件，才能看明白运放参数，用好运放。下面介绍运放的直流参数。

2. 输入失调电压 V_{OS}

输入失调电压是运放输入电路不对称引起的,即在输入电压 $V_{IN+}=V_{IN-}$ 的情况下,还等效存在一个小的电压源,使输出偏移零点。通常,该参数以室温下的电压值表示,通常为 μV 或 mV 数量级。

输入失调电压随温度变化而变化,称为输入失调电压温漂,单位为 $\mu V/^{\circ}C$ 或 $mV/^{\circ}C$ 。

例如,对于 CMOS 运放, MCP601 的输入失调电压为 $2mV$,输入失调电压温漂为 $2.5\mu V/^{\circ}C$ 。

每一个运放的输入失调电压都不同,但是对于一个运放来说是一个固定值。在闭环放大倍数很小时,输入失调电压对放大器的影响不大,但是对于闭环放大倍数很大的放大器来说,将减小动态输出范围。

例如,对于如图 2-2 所示的同相放大器,其输出电压表达式为

$$V_{OUT}=(1+R_F/R_I)(V_{IN}+V_{OS})$$

如果 V_{OS} 为 $1mV$,则 V_{OS} 对于输出的影响为 $101mV$,若是运放输出电压为 $4V$,则 V_{OS} 的影响为 2.5% 。

3. 输入偏置电流 I_B

所有运放的输入端都吸收或流出电流,如图 2-3 所示。两个引脚输入电流中的相同(平均)部分称为输入偏置电流,为 $I_B=(I_{B+}+I_{B-})/2$,而不同部分称为输入失调电流: $I_{OS}=(I_{B+}-I_{B-})$ 。对于 CMOS 或 FET 输入结构的运放,输入电流来自输入保护(ESD)电路,其输入电流 I_B 很小,一般在几皮安到几百皮安之间。双极性输入结构的运放,输入偏置电流来自晶体管的基极,一般在几纳安到几百纳安之间。

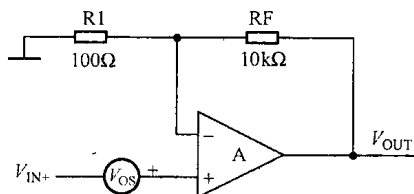


图 2-2 同相放大器

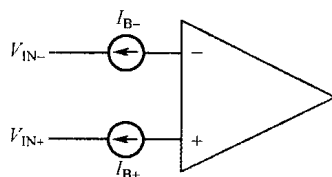


图 2-3 运放的输入电流示意图

输入偏置电流通过输入端连接的外电阻起作用,例如,如果运放外引脚的电阻为 $100k\Omega$,输入偏置电流为 $100nA$,则在外电阻上将有 $10mV$ 的压降,该压降就像在输入端加一个误差电压源,误差电压源的电压被放大,引起输出误差。对于 CMOS 输入结构运放来说,若输入偏置电流为 $100pA$,则 $100k\Omega$ 电阻上的压降只有 $10\mu V$,在大部分情况下,可以忽略该压降。

图 2-4 是一个有源滤波器电路,在电路中,运放的同相端连接阻值很大的电阻,当采用双极型输入结构的运放时,若偏置电流为 $100nA$,按照图中参数,将在输出端引起 $102.7mV$ 的误差,但当采用 CMOS 输入结构的运放时,若偏置电流为 $100pA$,则在运放输出端产生 $102.7\mu V$ 的误差。

对于 CMOS 运放,输入失调电流与输入偏置电流的数量级相同。例如,对于 TLV2472 运放,偏置电流为 $100pA$,失调电流也为 $100pA$ 。但是,对于双极型运放,偏置电流与失调电流相差很大,例如对于 LM358,其偏置电流最大为 $500nA$,而失调电流最大为 $50nA$ 。

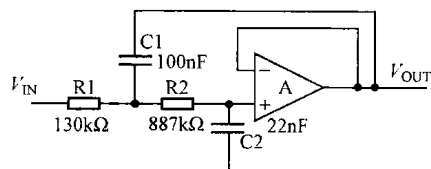


图2-4 有源滤波器电路

输入失调电流也是随温度的变化而变化的, 对于 CMOS 运放来说, 一般可以忽略。对于双极型运放, 一般为几皮安至几十皮安的数量级, 与偏置电流相比很小。例如 LM358, 失调电流最大为 50nA, 失调电流温度系数为 10pA/°C。

4. 开环增益 A_{OL}

运放的开环增益是输出电压信号与输入信号之差的比值。理想情况下的开环增益是无穷大。但实际上, 由于开环增益是有限值, 所以输出电压的变化 ΔV_{OUT} 除以开环增益就是输入端的电压变化 ΔV , 如下式所示:

$$A_{OL}(\text{dB})=20\lg(\Delta V_{OUT}/\Delta V)$$

输入电压变化 ΔV 可以用等效在运放输入端的电压源表示, 这相当于一个输入端的误差源 $V_{OLERROR}$ 。该误差源乘以闭环增益, 就是输出误差。当开环放大倍数为无穷大时, 该输入电压源电压为 0, 相当于输出误差为 0。

$A_{OL}(\text{dB})$ 的范围一般在 95~120dB 之间, 与电压放大倍数 $A_{OL}(V/V)$ 之间的关系如下式:

$$A_{OL}(V/V)=10^{A_{OL}(\text{dB})/20}$$

一般情况下, 每个运放的开环增益都不相同, 差别可以达到 30%。

增益非线性是指输入信号不同时, 放大倍数不是常数的现象, 例如 AD623 的最大增益非线性为 10ppm。一般运放手册没有该项参数。

5. 共模电压抑制比 CMRR

共模电压抑制比 CMRR 是放大器对共模输入信号的抑制能力, 由于该能力不是无穷大, 所以引起误差 $CMRR_{ERROR}$ 。CMRR 用下式表示:

$$CMRR(\text{dB})=20\lg(\Delta V_{CM}/\Delta V)$$

ΔV 是共模抑制等效的输入误差 $CMRR_{ERROR}$, ΔV_{CM} 表示共模输入电压的变化。

一般情况下, 共模抑制比的范围为 45~90dB。例如, 运放共模抑制比为 80dB, 当输入 3V 的共模电压时, 等效共模输入误差 $CMRR_{ERROR}$ 为 0.3mV。

6. 电源电压抑制比 PSRR

电源电压抑制比 PSRR 表示运放对电源电压变化的灵敏度, 典型的电源电压抑制比值为 60~100dB, 例如, MCP601 的 PSRR 的典型值为 88dB。

电源电压抑制比如下式:

$$PSRR(\text{dB})=20\lg(\Delta V_{SUPPLY}/\Delta V)$$

ΔV 是电源波动引起的输入电压误差, 就是 $PSRR_{ERROR}$, V_{SUPPLY} 为 $V_{DD}-V_{SS}$ 。

例如, 一个用电池供电的运放电路, 其闭环放大倍数为 101, 该运放的电源电压抑制比为 66dB, 当电源电压从 6.8V 降到 5.8V 时, 放大器的等效输入电压 ΔV 为 0.5mV, 引起输出电压变化为 $0.5\text{mV} \times 101 = 50.5\text{mV}$ 。若参考电源为 4.096V 的 10 位 ADC, 则相当于 12.6 个最小有效数字 (每个字为 4mV)。

7. 共模输入电压范围 V_{CM}

共模输入电压范围也是一个运放的重要参数。下面列出几个运放的共模输入电压范围。

AD623 的共模输入电压范围为 $(-V_{SS})-0.15\text{V} \sim (+V_{SS})-1.5\text{V}$ 。

LM358 的共模输入电压范围为 $0 \sim V_{CC}-1.5\text{V}$ 。