



面向新工科的电工电子信息基础课程系列教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导分委员会推荐教材



第1版为浙江省高等教育重点建设教材

第3版为浙江省“十二五”优秀教材

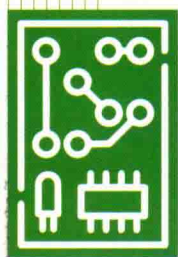
第4版为浙江省首批“新形态”建设教材

# 电子系统 设计与实践



贾立新 主编

倪洪杰 王辛刚 副主编



## MCU+FPGA

### 大量典型、实用的设计案例

源自作者 20 多年指导电子设计竞赛和从事电子系统设计课程教学的深厚积累

66个  
视频  
时长 600 多分钟

教学  
大纲+课件

模块化  
综合实验箱

清华大学出版社





面向新工科的电工电子信息基础课程系列教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导分委员会推荐教材



第1版为浙江省高等教育重点建设教材

第3版为浙江省“十二五”优秀教材

第4版为浙江省首批“新形态”建设教材

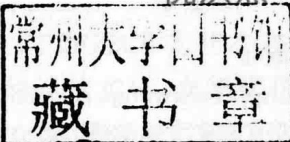
# 电子系统 设计与实践



贾立新 主编

倪洪杰

王辛刚 副主编



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书由模拟电子系统设计、数字电子系统设计、单片机电子系统设计和综合电子系统设计四部分组成,包括基于集成运放的放大电路设计、滤波器设计、直流稳压电源设计、FPGA/CPLD 应用基础、STM32F407 单片机的基本原理、单片机最小系统设计、单片机串行总线扩展技术、单片机并行总线扩展技术、数字化语音存储与回放系统、DDS 信号发生器、高速数据采集系统、CAN 总线通信系统 12 章内容。内容编排循序渐进,从器件、单元电路设计,到以 STM32F407 单片机和 Cyclone IV 系列 FPGA 为核心器件、配以高性能模拟器件的综合电子系统设计。

本书可作为电类专业本科生实践课程的教材或参考书,也可供相关技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计与实践/贾立新主编.—4版.—北京:清华大学出版社,2019  
(面向新工科的电工电子信息基础课程系列教材)  
ISBN 978-7-302-53541-6

I. ①电… II. ①贾… III. ①电子系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 180072 号

责任编辑:文怡  
封面设计:王昭红  
责任校对:梁毅  
责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5 字 数:495千字

版 次:2007年4月第1版 2019年11月第4版 印 次:2019年11月第1次印刷

定 价:59.00元

产品编号:084436-01

大学生课外科技活动已经成为人才培养的重要环节。作为学生课外科技活动的重要平台,全国大学生电子设计竞赛对高校电子信息类专业的人才培养发挥了巨大促进作用,同时也极大促进了相关课程建设和改革。近几年来,随着工程教育专业认证和一流学科建设的开展,对学生能力培养提出了新的要求。基于上述背景,越来越多的电子信息类专业开设了以培养学生工程实践能力为主要目标的电子系统设计课程,将学生电子系统设计能力的培养常态化、课程化,增加学生受益面。编写本书的目的就是为具备模电、数电、单片机等基础知识的学生开设电子系统设计、电子设计竞赛赛前训练等实践课程提供一本合适的教材或参考书。

本书第1版为浙江省高等教育重点建设教材。第2版和第3版为浙江工业大学重点建设教材,其中第3版被评为浙江省“十二五”优秀教材。第4版被列为浙江省首批“新形态”建设教材。

全书内容可分为以下4个部分:

第一部分为模拟电子系统设计。这部分内容由第1~3章组成。第1章介绍集成运放的模型、典型电路、主要参数,列举宽带放大电路、AGC放大电路、仪表放大器电路、波形变换电路、V/I变换电路、单电源放大电路等设计实例。第2章介绍MFB有源滤波器的手工设计方法以及开关电容滤波器的原理和典型芯片的应用。第3章介绍线性稳压电源设计、DC/DC开关电源基本原理及典型DC/DC芯片的应用。

第二部分为数字电子系统设计。这部分内容由第4章组成。内容包括Intel公司Cyclone IV系列主流芯片的结构和原理,以EP4CE6E22C8为核心芯片的FPGA最小系统设计,信号发生器的设计。通过信号发生器的设计实例,介绍锁相环(PLL)和嵌入式存储器等FPGA内部资源的应用、Quartus II 13.0软件工具的操作以及数字系统的设计流程。

第三部分为单片机电子系统设计。这部分由第5~8章组成。第5章介绍基于Cortex-M4内核的STM32F407单片机基本原理。第6章介绍单片机最小系统设计。该单片机最小系统由一片单片机和一片CPLD构成,具有集成度高、扩展方便的优点,是构成单片机电子系统和综合电子系统的基础。第7章介绍串行总线扩展方法。通过程控放大器、电阻测量仪两个设计实例介绍SPI总线和I<sup>2</sup>C总线的接口设计和编程方法。第8章介绍并行总线扩展方法。内容包括STM32F407单片机FSMC接口,单片机与FPGA之间的并行接口设计。然后介绍两个设计实例——“等精度频率计”和“简易16位SPI接口”。

# 前言

第四部分为综合电子系统设计。这部分内容由第 9~12 章组成。分别介绍数字化语音存储与回放系统、DDS 信号发生器、高速数据采集系统和 CAN 总线通信系统 4 个典型的综合电子系统。从方案设计、理论分析计算、软硬件设计、系统调试等 4 方面介绍综合电子系统的设计方法。

全书内容编排循序渐进,分为器件、单元电路、电子系统 3 个层次。

第一个层次是器件。本书介绍众多性能优异的模拟、数字、数模混合集成电路,如 Cortex-M4 内核单片机、Cyclone IV 系列 FPGA、MAX II 系列 CPLD、串行大容量 FlashROM、步进电机驱动芯片、高速 A/D 转换器(ADC)、高速 D/A 转换器(DAC)、高分辨率 A/D 转换器、乘法型 D/A 转换器、宽带运放、精密运放、电流反馈运放、压控增益放大器(VGA)、高速电压比较器、开关电容滤波器、模拟开关、专用 DDS 芯片、DC/DC 芯片等。这些器件在理论课教材中很少涉及,读者可以通过本书理解其工作原理,掌握其使用方法。

第二个层次是单元电路。本书介绍许多在电子系统中常用的单元电路。包括:运放构成的放大电路,RC 有源滤波器,开关电容滤波器,FPGA 内部数字电路(包括 PLL、ROM、双口 RAM、FIFO),单片机和 FPGA 之间的接口电路(简易 SPI 接口、并行接口),高速 ADC 电路、高速 DAC 电路等。

第三个层次是电子系统。本书介绍程控放大器、电阻测量仪、等精度频率计、语音存储与回放系统、DDS 信号发生器、高速数据采集、CAN 总线通信系统 7 个综合电子系统。这些综合电子系统特点是:数模结合、软硬结合;既强调功能,又强调指标;涉及的技术具有很强的通用性,能起到举一反三的作用。完成这些电子系统的设计需要综合多种技术,采用适当的工具软件才能完成,体现了复杂工程问题的特征。

本教材体现以下特色:

(1) 本书为一本“新形态”教材。以纸质教材为载体,通过嵌入在教材中的二维码作为互联网移动终端设备入口,向读者提供与教材内容相关的知识点讲解视频、实验演示视频、测试程序等资源。“新形态”教材便于学生线上线下自主学习,而且二维码对应的数字资源也可以不断更新。

(2) 模块化的电子系统设计方法。其设计思路是将电子系统分成 3~6 个模块,每个模块由 1~3 个单元电路组成,每个单元电路通常由一片集成芯片实现。模块化设计方法提高了电子系统设计的抽象层次,降低了电子系统的设计难度,也便于采用团队协作的方式由多名学生完成一个电子系统的设计。

(3) 丰富的设计案例。本书采用了作者 20 多年指导电子设计竞赛和电子系统设计课程教学所积累的设计案例。这些设计案例的硬件电路原理图、程序代码均经过调试验

证,同时根据学生在实践过程中出现的问题持续改进。

(4) 每一章节后面均安排思考题和设计训练题。思考题帮助读者理解书本内容,也可以作为教师教学过程中试卷命题时的参考。设计训练题与每一章内容紧密结合,适合学生实践训练。

(5) 作者研制开发了一套模块化综合电子系统实验平台,将书中出现的典型电路制作成标准尺寸的模块,通过选用不同的模块可以构建书中所有设计实例和大部分设计训练题。该自制实验设备在2010年获全国电子技术教学研究会实验教学成果一等奖。

参加本书编写的有贾立新、倪洪杰、王辛刚等。第2章由倪洪杰编写,第3章由王辛刚编写,其余各章由贾立新编写。贾立新负责全书统稿。清华大学出版社的编辑为本书的出版做了卓有成效的工作,在此深表谢意。

本书的出版得到了2017年度浙江工业大学重点教材建设项目和浙江工业大学控制科学与工程学科教材培育基金的资助。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处。如果您在阅读本书的过程中发现问题或有改进本书的建议,请与作者联系。

作 者

2019年5月于浙江工业大学



电子系统设计课件.zip

第 1 章 基于集成运放的放大电路设计 .....	1
1.1 运算放大器的模型 .....	2
1.2 集成运放构成的基本放大电路 .....	4
1.3 集成运放的参数 .....	10
1.4 运放应用电路设计举例 .....	18
1.5 单电源放大电路设计 .....	25
思考题 .....	28
设计训练题 .....	29
第 2 章 滤波器设计 .....	30
2.1 概述 .....	31
2.2 无限增益多重反馈滤波器设计 .....	37
2.2.1 二阶 MFB 低通滤波器设计 .....	37
2.2.2 二阶 MFB 高通滤波器设计 .....	40
2.2.3 二阶 MFB 带通滤波器设计 .....	42
2.2.4 二阶 MFB 带阻滤波器设计 .....	43
2.2.5 有源滤波器的级联 .....	44
2.3 开关电容滤波器 .....	47
2.3.1 开关电容滤波器的基本原理 .....	48
2.3.2 单片集成开关电容滤波器的应用 .....	50
思考题 .....	55
设计训练题 .....	55
第 3 章 直流稳压电源设计 .....	58
3.1 概述 .....	59
3.2 线性直流稳压电源设计 .....	61
3.3 开关直流稳压电源设计 .....	67
3.3.1 降压型 DC/DC 变换电路设计 .....	67
3.3.2 升压型 DC/DC 变换电路设计 .....	69
3.3.3 极性反转型 DC/DC 变换电路设计 .....	70
思考题 .....	71
设计训练题 .....	72

# 目录

第4章	FPGA/CPLD应用基础	73
4.1	FPGA/CPLD的结构和原理	74
4.1.1	概述	74
4.1.2	FPGA基本结构和原理	75
4.1.3	CPLD基本结构和原理	83
4.2	FPGA最小系统设计	86
4.2.1	设计方案	86
4.2.2	硬件电路设计	88
4.2.3	硬件电路测试	90
4.3	数字系统设计实例——信号发生器设计	91
4.3.1	设计题目	91
4.3.2	方案设计	91
4.3.3	单元电路设计	95
4.3.4	Quartus II 13.0的操作流程	98
4.3.5	SignalTap II 调试工具的使用	110
4.3.6	JTAG 间接模式编程配置器件	113
	思考题	116
	设计训练题	117
第5章	STM32F407 单片机的基本原理	119
5.1	概述	120
5.2	时钟系统	122
5.3	通用输入/输出端口	126
5.4	定时器	136
5.5	中断系统	141
	思考题	148
第6章	单片机最小系统设计	150
6.1	方案设计	151
6.2	硬件电路设计	153
6.3	CPLD 内部逻辑电路设计	156
6.3.1	4×4 键盘接口设计	156
6.3.2	TFT 模块接口设计	161
6.3.3	地址译码器的设计	162

6.4	最小系统测试程序设计 .....	164
	思考题 .....	171
	设计训练题 .....	172
<b>第7章</b>	<b>单片机串行总线扩展技术 .....</b>	<b>173</b>
7.1	概述 .....	174
7.2	SPI 总线扩展技术 .....	174
7.2.1	SPI 总线及软件模拟 .....	174
7.2.2	STM32F407 单片机的 SPI 总线接口 .....	177
7.2.3	SPI 总线扩展实例——程控放大器设计 .....	182
7.3	I <sup>2</sup> C 总线扩展技术 .....	187
7.3.1	I <sup>2</sup> C 总线及软件模拟 .....	187
7.3.2	STM32F407 单片机的 I <sup>2</sup> C 总线接口 .....	193
7.3.3	I <sup>2</sup> C 总线扩展实例——基于 ADS1100 的电阻测量仪设计 .....	197
	思考题 .....	205
	设计训练题 .....	206
<b>第8章</b>	<b>单片机并行总线扩展技术 .....</b>	<b>208</b>
8.1	概述 .....	209
8.2	STM32F407 单片机的并行总线接口 .....	209
8.3	STM32F407 单片机与 FPGA 的并行接口设计 .....	212
8.4	并行总线扩展实例——等精度频率计设计 .....	215
8.5	并行总线扩展实例——简易 16 位 SPI 接口设计 .....	223
	思考题 .....	228
	设计训练题 .....	228
<b>第9章</b>	<b>数字化语音存储与回放系统 .....</b>	<b>231</b>
9.1	设计题目 .....	232
9.2	方案设计 .....	232
9.3	STM32F407 单片机的 ADC .....	233
9.4	STM32F407 单片机的 DAC .....	240
9.5	模拟子系统设计 .....	243
9.6	M25P16 的接口设计 .....	246
9.7	系统软件设计 .....	252

# 目录

9.8 系统调试 .....	255
思考题 .....	257
设计训练题 .....	257
<b>第 10 章 DDS 信号发生器 .....</b>	<b>259</b>
10.1 设计题目 .....	260
10.2 方案设计 .....	260
10.3 DDS 子系统设计 .....	262
10.4 模拟量输出通道设计 .....	265
10.4.1 高速 DAC 电路设计 .....	265
10.4.2 放大滤波电路设计 .....	268
10.5 系统软件设计 .....	270
10.6 系统调试 .....	273
思考题 .....	276
设计训练题 .....	277
<b>第 11 章 高速数据采集系统 .....</b>	<b>278</b>
11.1 设计题目 .....	279
11.2 方案设计 .....	279
11.3 模拟量输入通道设计 .....	281
11.3.1 高速 ADC 电路设计 .....	281
11.3.2 信号调理电路设计 .....	284
11.4 FIFO 数据缓冲电路设计 .....	285
11.5 系统软件设计 .....	291
11.6 系统调试 .....	294
思考题 .....	296
设计训练题 .....	296
<b>第 12 章 CAN 总线通信系统 .....</b>	<b>298</b>
12.1 CAN 总线简介 .....	299
12.2 CAN 总线协议 .....	299
12.3 STM32F407 单片机的 CAN 控制器 .....	302
12.4 CAN 通信系统设计举例 .....	303
12.4.1 设计题目 .....	303

12.4.2 方案设计 .....	304
12.4.3 系统软件设计 .....	305
12.4.4 系统调试 .....	310
思考题 .....	311
设计训练题 .....	311
参考文献 .....	313





## 1.1 运算放大器的模型

运算放大器最早应用于模拟计算机中,它可以完成加法、减法、微分、积分等各种数学运算。随着集成电路技术的不断发展,运算放大器的应用日益广泛,可以实现信号的产生、变换、处理等各种功能,已成为构成模拟系统最基本的集成电路。

运算放大器是由多级基本放大电路直接耦合而组成的高增益放大器。通常由高阻输入级、中间放大级、低阻输出级和偏置电路组成,其内部结构框图如图 1.1-1 所示。

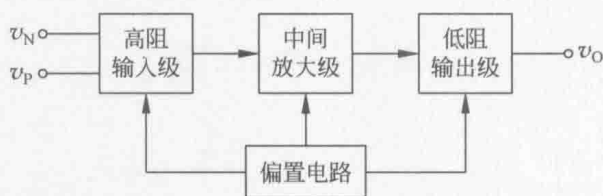


图 1.1-1 运算放大器的内部结构框图

实际的运算放大器内部电路比较复杂,为了便于理解其原理,这里给出了如图 1.1-2 所示的简化运算放大器电路图。第 1 级为由  $T_1$ 、 $T_2$  对管构成的基本差分放大电路,把双端输入信号变成单端输入信号;第 2 级进一步放大输入信号并提供频率补偿;第 3 级为典型的甲乙类功放,增加运放的驱动能力。

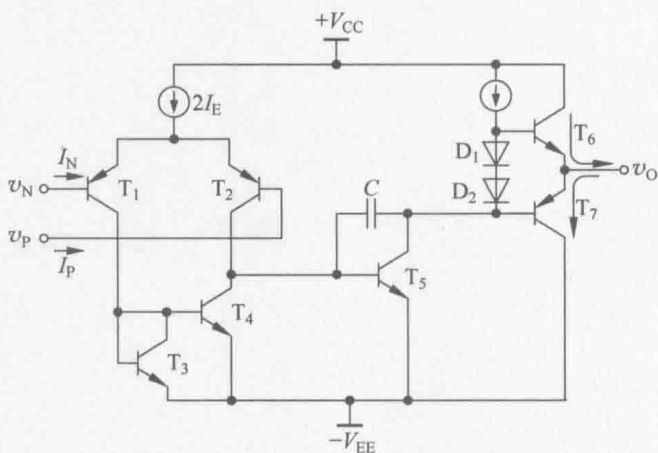


图 1.1-2 简化的运算放大器电路图

当运算放大器与外部电路连接组成各种功能电路时,从系统角度看,无须关心其复杂的内部电路,而是着重研究其外特性。具体地讲,人们利用厂商提供的运放参数构成表征外特性的简化运算模型。在分析由运算放大器构成的模拟电路时,常用的有理想运算放大器模型和实际运算放大器模型。

## 1. 理想运算放大器模型

理想运算放大器的模型如图 1.1-3 所示,它具有以下特性:

- (1) 开环电压增益  $A_{vo} = \infty$ ;
- (2) 输入电阻  $r_{id} = \infty$ ;
- (3) 输出电阻  $r_o = 0$ ;
- (4) 上限截止频率  $f_H = \infty$ ;
- (5) 共模抑制比  $K_{CMR} = \infty$ ;
- (6) 失调电压、失调电流和内部噪声均为 0。

对于理想运算放大器的前 3 条特性,通用运算放大器一般可以近似满足。后 3 条特性通用运算放大器不易达到,需要选用专用运算放大器来近似满足。如可选用宽带运算放大器获得很宽的频带宽度,选用精密运算放大器使失调电压、内部噪声趋于 0。

从理想运算放大器的特性可以导出理想运放在线性运用时具有的两个重要特性:

- (1) 理想运算放大器的同相输入端和反相输入端的电流为 0,即  $i_N = i_P = 0$ 。这一结论是由理想运放输入电阻  $r_{id} = \infty$  而得到的;
- (2) 理想运算放大器的两输入端电压差等于 0,即  $v_N = v_P$ ,这一结论是由理想运放的电压增益  $A_{vo} = \infty$ ,输出电压为有限值而得到的。

## 2. 实际运算放大器模型

实际运算放大器的模型如图 1.1-4 所示。实际运算放大器的模型包括以下典型参数:

- (1) 差分输入电阻  $r_{id}$ ;
- (2) 开环电压增益  $A_{vo}$ ;
- (3) 输出电阻  $r_o$ 。

其中,增益  $A_{vo}$  也称为开环差模增益,在输出不加负载时有:

$$v_o = A_{vo} v_{id} = A_{vo} (v_P - v_N) \quad (1.1-1)$$

$$v_{id} = \frac{v_o}{A_{vo}} \quad (1.1-2)$$

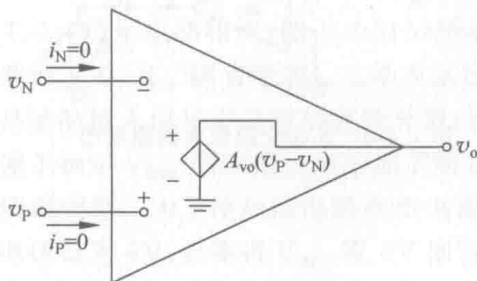


图 1.1-3 理想运算放大器模型

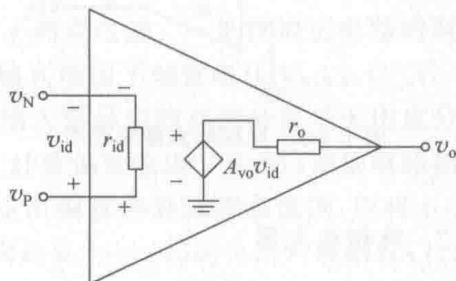


图 1.1-4 实际运算放大器的模型

实际运放的参数由器件的数据手册给出。如运算放大器 LM741 的主要参数为： $r_{id}=2\text{M}\Omega$ ， $A_{vo}=200\text{V/mV}$ ， $r_o=75\Omega$ 。由于运算放大器的开环增益都非常大，对于一个有限的输出，只需要非常小的差分输入电压。譬如，要维持  $v_o=6\text{V}$ ，运算放大器 LM741 需要  $v_{id}=6/200000=30\mu\text{V}$ ，是非常小的电压。

## 1.2 集成运放构成的基本放大电路

### 1. 反相放大电路

比例运算放大电路分为反相放大器和同相放大器。反相放大器的基本电路结构如图 1.2-1 所示。其闭环电压放大倍数：

$$A_{vf} = v_o/v_i = -R_2/R_1 \quad (1.2-1)$$

用反相放大器可以很方便地实现各种增益的放大电路。要想改变放大电路的电压增益，无须改变运放本身，只需调整电路中  $R_1$  和  $R_2$  的比值即可。如要设计一个电压增益为 30 倍的反相放大器，只需  $R_1$  取  $1\text{k}\Omega$ 、 $R_2$  取  $30\text{k}\Omega$  就可实现。反相放大器的输入电阻等于  $R_1$ 。从增加放大电路输入电阻的角度来看， $R_1$  应尽量取得大一些，但  $R_1$  取得太大，则在相同电压增益时，势必  $R_2$  也要增加。 $R_2$  太大会引起放大电路工作不稳定，因此，在设计反相放大器时， $R_1$  既不能取得太小，也不能取得太大。

当只放大交流信号时，反相器的输入端和输出端应接入隔直电容，如图 1.2-2 所示。电容器  $C_1$  和  $C_2$  为耦合电容，起隔离直流成分的作用。 $C_1$  和  $C_2$  的取值由所需的低频响应和电路的输入阻抗(对于  $C_1$ )或负载(对于  $C_2$ )电阻来确定。对图 1.2-2 所示电路， $C_1$  和  $C_2$  可由下式来确定：

$$C_1 = 1000/(2\pi f_L R_1) \quad (1.2-2)$$

$$C_2 = 1000/(2\pi f_L R_L) \quad (1.2-3)$$

式中， $f_L$  是放大电路的下限频率。若  $R_1$ 、 $R_L$  单位为  $\text{k}\Omega$ ， $f_L$  单位为  $\text{Hz}$ ，则求得的  $C_1$ 、 $C_2$  单位为  $\mu\text{F}$ 。

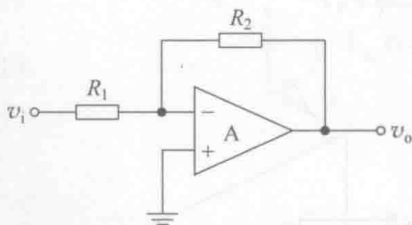


图 1.2-1 反相放大器原理图

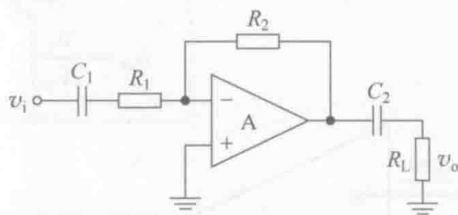


图 1.2-2 反相交流放大器原理图

### 2. 同相放大器

如果要求放大电路有足够大的输入电阻，可以采用同相放大器的结构。同相放大器的电路如图 1.2-3 所示。在同相放大电路中，输入信号  $v_i$  直接加到运放的同相输入端，

输出电压  $v_o$  通过  $R_2$  送回运放的反相输入端, 形成电压串联负反馈。同相电压放大器的闭环电压放大倍数为

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.2-4)$$

当  $R_1 = \infty, R_2 = 0$  时, 相当于运放的输出端和反相输入端直接连接, 就得到同相放大器的一个特例——电压跟随器。电压跟随器输入阻抗无限大, 输出阻抗很小, 可起到阻抗变换的作用。例如, 当信号源的内阻比较大时, 输入级采用电压跟随器, 可有效避免信号源的衰减。电压跟随器也可以用于输出级, 提高带负载能力。需要指出的是, 并不是任何运放都可以构成电压跟随器。例如, OPA552 在构成放大器时要求增益 5 倍以上才能获得良好性能, 因此该运放不宜构成电压跟随器。而运放 OPA551 具有单位增益稳定 (unity-gain-stable) 的特性, 可以构成电压跟随器。

### 3. 加法电路

加法电路常用于两种模拟信号的相加, 其原理图如图 1.2-4 所示。利用叠加原理, 得到加法电路的输出表达式为

$$v_o = -\left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2}\right) \times R_f \quad (1.2-5)$$

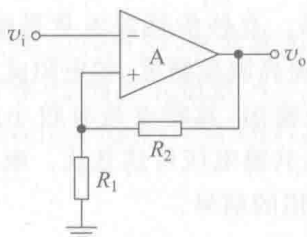


图 1.2-3 同相放大器原理图

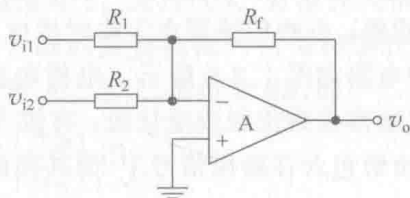


图 1.2-4 加法电路原理图

**例 1.2-1** 如图 1.2-5(a) 所示的  $v_1$  和  $v_2$  为两路模拟信号:  $v_1 = 0.1\sin 1000\pi t$  (V);  $v_2$  为峰峰值为 4V、频率为 2kHz 的三角波。设计加法电路将  $v_1$  和  $v_2$  相加, 满足  $v_o = -(10v_1 + v_2)$ 。要求加法电路中的运放用 +12V 单电源供电。

**解:** 模拟电路的设计步骤通常是先确定电路结构, 后确定元件的参数。本题的加法电路是在图 1.2-4 所示的基本电路基础上改进得到的, 其原理图如图 1.2-5(b) 所示。与图 1.2-4 所示电路相比, 图 1.2-5(b) 所示电路做了两点改进: 一是在加法电路的两个输入端加了  $C_1$ 、 $C_2$  隔直电容; 二是在运放的同相输入端加了偏置电压  $V_{REF}$ 。 $C_1$ 、 $C_2$  的作用是滤除输入信号中含有的直流分量 (这里假设输入信号中的直流分量是无用成分), 同时便于确定  $V_{REF}$  的取值。由于加了隔直电容, 在计算偏置电压  $V_{REF}$  时, 加法电路相当于电压跟随器。为了使加法电路在单电源供电时输出端获得最大动态范围, 应将  $v_o$  的静态电压设为 6V, 只需将  $V_{REF}$  取 6V 即可。为了满足  $v_o = -(10v_1 + v_2)$ , 根据式 (1.2-5), 加法电路的电阻选取如下:  $R_1 = 1\text{k}\Omega, R_2 = 10\text{k}\Omega, R_f = 10\text{k}\Omega$ 。由于  $v_1$  的频率为 500Hz, 当电容  $C_1$  取值为  $10\mu\text{F}$ , 对应的阻抗  $X_{C1}$  约为  $32\Omega$ , 是  $R_1$  阻值的 3.2%。三角波的频率

为 2kHz,当电容  $C_2$  取值为  $0.33\mu\text{F}$  时,对应的阻抗  $X_{C_2}$  约为  $241\Omega$ ,是  $R_2$  阻值的 2.4%。由于  $C_1$ 、 $C_2$  的阻抗不为 0,会使加法电路的输出产生一定的误差。增加  $C_1$ 、 $C_2$  的电容值,可以减小加法电路的输出误差。需要指出的是,由于  $C_1$  电容值较大,采用了电解电容,连接时应注意电容的极性。如果  $C_1$  的极性接反,电容会产生漏电流,起不到隔直作用,导致  $v_o$  输出饱和。

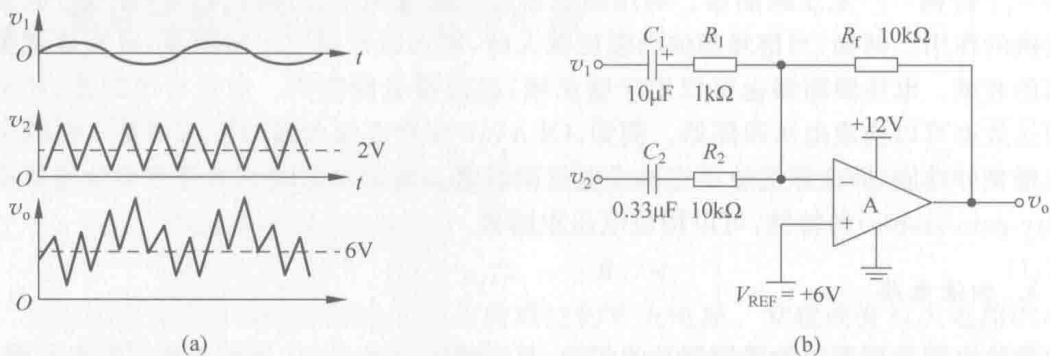


图 1.2-5 例 1.2-1 波形图与原理图

#### 4. 基本差分放大电路

在工程实际中,放大器的输入信号通常来自传感器。有些传感器本身是电桥电路,如称重传感器;有些传感器在工作时接成电桥电路,以提高测量精度,如电阻式温度传感器,其典型电路如图 1.2-6 所示。电桥电路有两路信号输出,其特点是有较小的差模信号,电压值通常是微伏级或毫伏级;有较大的共模信号,共模电压可达几伏。电桥电路的有用信号恰恰包含在差模信号中,而共模信号通常是无用的信号。

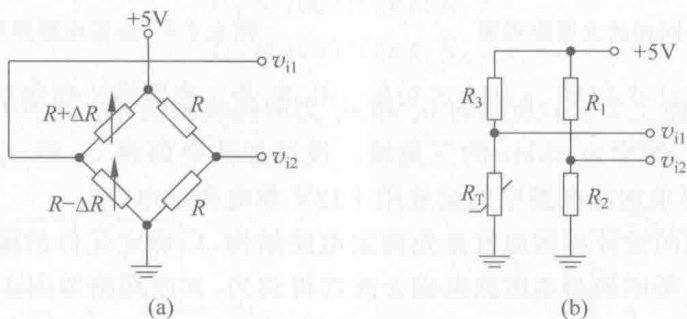


图 1.2-6 传感器电桥电路

(a) 称重传感器; (b) 电阻式温度传感器

基本差分放大电路原理图如图 1.2-7 所示。图中,  $v_{id}$  表示差模电压,  $v_{ic}$  表示共模电压。由于差分放大电路工作在线性状态,对其分析可以采用叠加原理。

令  $v_{i2}=0$ ,只有  $v_{i1}$  作用时的电路输出电压  $v_{o1}$  为

$$v_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} \times v_{i1} \tag{1.2-6}$$