

传感器及其接口技术

苏铁力 关振海 孙继红 孙彦卿 编著



中国石化出版社

传感器及其接口技术

苏铁力 关振海 孙继红 孙彦卿 编著

中国石化出版社

前 言

在计算机高度发展的今天，作为计算机拾取信息的“五官”——传感器的作用越来越重要。只有研制出性能优良的传感器，解决各种物理、化学、生物等非电量的转换问题，才能使计算机在自动测量、信息处理及自动控制中充分发挥思维判断作用。

由于半导体器件及微加工技术的发展，现在已能制造出各种各样的传感器。但其中大多数敏感器件拾取的信息，由于温漂及非线性等各种因素的影响，必须经过适当的接口电路的调理才能满足信号处理、显示、控制的要求。在信号处理、显示和控制中，微型机是一种得心应手的工具。为了适应传感器的教学、研制、生产和应用的需要，我们编写了本书。

我们的编写原则是注重实用性，同时考虑到先进性，还要尽可能地覆盖传感器的各个领域。为了使读者能更好地掌握传感器及其接口技术，进而开发应用传感器，我们从实用的角度简要地介绍了各种传感器的基本工作原理及特性。

我们编写的方法是深入浅出，简明扼要。对所涉及的传感器，除了介绍其基本原理外，都给出了关于该传感器使用方法及信号调理电路。并在每章中都选择几个信号调理电路的例子进行分析，讨论其设计思路和调整方法。所给出的信号调理电路都是经过精选的典型实用电路。在传感器与微机接口技术一章中，我们给出了各种传感器与微机的接口方法，并列举了作为测量和控制用的智能仪表，以说明传感器与微机的接口技术。

全书共有九章。为便于读者查阅，按传感器的用途分类。第一章回顾和介绍传感器接口技术的电路基础知识；第二章介绍在研制和选用传感器时常用的各种性能指标，以及传感器信号的线性化和温度补偿的主要方法；第三章为检测力的传感器及其接口技术；第四章为检测温度的传感器及其接口技术；第五章为检测光、色、图像的传感器及其接口技术；第六章为磁敏传感器及其接口技术；第七章为气、湿敏传感器及其接口技术；第八章介绍了一些前面未包括的传感器及其接口技术，如热电偶、热电阻、电容传感器、光纤传感器和超声波传感器等；第九章为传感器与微机的接口技术。

该书在编写过程中，参考了国内外有关方面的书刊，作者在这里向被选用书刊文章的原作者表示感谢。

本书可供测量与仪表、自动化、计算机应用、无线电及微电子专业和其它相关专业的工程技术人员和高校师生使用。

该书内容曾作为教材在教学中使用过多年，但由于作者水平所限，还不可避免地存在一些缺点错误，敬请读者指正。

作 者

目 录

第一章 传感器接口技术电路基础..... 1

第一节 放大、滤波、比较和波形发生电路..... 1

一、测量放大器..... 1

二、滤波器..... 3

三、电压比较器..... 7

四、波形发生器..... 10

第二节 恒压源和恒流源..... 12

一、恒压源..... 12

二、恒流源..... 15

第三节 桥路分析..... 18

一、直流电桥..... 18

二、交流电桥..... 21

第四节 桥路信号的拾取..... 23

一、单运放检测电路..... 23

二、差分输入数据放大器检测电路..... 24

第五节 信号传送方式..... 25

一、四线式传送方式..... 25

二、二线式传送方式..... 26

三、三线式传送方式..... 27

第六节 转换电路..... 27

一、电压—电流转换电路..... 27

二、电流—电流转换电路..... 28

三、电荷—电压变换电路..... 30

四、电阻—电压变换电路..... 31

五、用 ICL8038 制作高质量的电压—频率
变换器..... 32

六、电容量—脉冲率变换电路..... 33

七、脉冲率—电压变换电路..... 35

第七节 模数转换电路..... 38

一、双积分 A/D 转换原理..... 38

二、 $3\frac{1}{2}$ 位 A/D 转换器..... 39

第八节 数字显示..... 44

一、荧光数码管显示..... 44

二、液晶显示(LCD)..... 45

三、发光二极管显示(LED)..... 46

第二章 传感器特性..... 48

第一节 传感器特性..... 48

一、关于输入量的特性..... 49

二、关于输入输出关系的静态响应特性... 49

三、动态响应特性..... 51

第二节 线性化..... 53

一、线性化的概念..... 53

二、数字线性化..... 53

三、模拟线性化..... 55

第三节 温度补偿..... 68

第四节 传感器接口电路设计..... 69

一、设计传感器接口电路需解决的问题... 69

二、传感器接口电路设计实例..... 70

第三章 压力传感器及其接口技术..... 74

第一节 压阻效应..... 74

一、压阻效应..... 74

二、压阻系数..... 75

第二节 压力敏感器件..... 76

一、半导体应变片的特点..... 76

二、半导体应变片的种类..... 77

三、半导体应变片的结构形式..... 78

第三节 压敏电阻电桥的特性及补偿..... 78

一、零位失调及温漂..... 78

二、灵敏度的温漂及补偿..... 79

三、非线性度及补偿..... 79

第四节 集成压力传感器..... 80

第五节 压力传感器接口技术..... 80

一、半导体压力传感器接口电路..... 81

二、压力变换器的传感器电路..... 82

三、压力变换器电路..... 83

四、袖珍式数字气压表电路..... 84

五、扩散硅压力变送器电路..... 86

六、设计实例..... 86

七、振动式汽车防盗继电器..... 89

八、制作数字式压力计..... 90

九、制作模拟显示器..... 92

十、制作有高度显示的气压计..... 92

十一、制作高度计..... 94

第四章 温度传感器及其接口技术 96

第一节 温度传感器分类 96

第二节 热敏电阻器 97

一、NTC 热敏电阻器 97

二、PTC 热敏电阻器 99

三、热敏电阻器的主要参数 100

第三节 pn 结温度传感器 101

一、pn 结正向电压与温度的关系 101

二、温敏二极管的主要参数 103

三、温敏晶体管 103

四、温敏晶体管的主要参数 104

第四节 温敏可控硅 104

一、温敏可控硅的结构及工作原理 104

二、开关温度的控制 105

第五节 集成温度传感器 106

一、电流型 PTAT 集成温度传感器 107

二、电压型 PTAT 集成温度传感器 107

第六节 温度传感器接口技术 108

一、使用 IC 温度传感器的温度控制系统 108

二、红外温度计控制电路 110

三、热敏电阻的使用方法 118

四、PTC 热敏电阻电机保护器 120

五、电子恒温槽 121

六、温敏可控硅的使用方法 122

七、使用温敏可控硅的温水锅炉温度 检出电路 124

八、数字温度计电路 125

九、非接触式温度计电路设计 126

十、热象检测与接口 128

十一、LED 发光输出的温度校正电路 129

第五章 光敏传感器及其接口技术 132

第一节 半导体的光电效应 132

一、半导体的光吸收 132

二、半导体的光电导效应 132

三、半导体的光生伏特效应 133

第二节 光敏电阻 134

一、CdS 光敏电阻工作原理 134

二、CdS 光敏电阻特性 134

第三节 光敏二极管 136

一、光敏二极管工作原理 136

二、光敏二极管特性 137

第四节 光电池 139

一、硅光电池的结构、符号和基本原理 139

二、光电池的基本特性 140

第五节 光敏晶体管 142

一、光敏晶体管的结构、符号和原理 142

二、光敏晶体管特性 143

三、异质结光敏晶体管和场效应光 敏晶体管 145

第六节 光控可控硅 145

一、光控可控硅的结构、符号和工作 原理 145

二、光控可控硅的特性参数 146

第七节 光电耦合器件 147

一、光电耦合器的工作原理 147

二、光电耦合器的基本特性 148

第八节 集成光敏器件 148

一、光放大器 148

二、半导体色敏器件 149

三、图像传感器 150

第九节 光敏传感器接口技术 153

一、减小暗电流影响的方法 153

二、实用线性光耦合放大器 155

三、光敏电阻的偏置电路及运动方向 检测器 157

四、光敏二极管的偏置电路及测光电路 159

五、光电池基本电路及换向控制电路 160

六、光敏三极管的基本电路和透明物体 透明度的测量电路 164

七、光控可控硅基本电路和冲床 保护电路 164

八、色敏传感器的测色电路 166

九、图像传感器的驱动、A/D 变换及信号 处理电路 166

第六章 磁敏传感器及其接口技术 171

第一节 霍尔效应和磁阻效应 171

一、霍尔效应 171

二、磁阻效应 173

第二节 霍尔元件 175

一、理想霍尔元件 175

二、霍尔元件的性能参数 176

三、集成霍尔元件 178

第三节 磁敏电阻 179

一、磁敏电阻结构 179

二、磁敏电阻特性 179

第四节 磁敏二极管	180	二、涂覆膜型陶瓷湿敏器件	217
一、磁敏二极管结构和工作原理	180	三、多孔氧化物湿敏器件	218
二、磁敏二极管特性	181	四、结型和 MOS 型 湿敏器件	219
三、集成磁敏二极管	182	第七节 湿敏器件的接口技术	219
第五节 磁敏晶体管	182	一、湿敏器件对电源的特殊要求	219
一、长基区磁敏晶体管结构和机理	182	二、湿度检测电路	220
二、长基区磁敏晶体管特性	183	三、湿度传感器的电路设计	222
三、集成磁敏晶体管	184	四、携带式测湿仪电路	226
第六节 磁敏传感器接口技术	184	第八章 其它传感器及其接口技术	227
一、霍尔传感器的基本电路	184	第一节 热电偶及其接口技术	227
二、集成霍尔传感器的基本电路	188	一、热电偶工作原理及种类	227
三、磁敏电阻基本电路及磁带终端 检测电路	191	二、热电偶冷端补偿	229
四、磁敏二极管基本电路及探伤电路	193	三、热电偶基本电路	232
五、磁敏三极管及集成磁敏三极管 接口电路	195	四、焊锡槽温度控制电路	236
六、无触点开关电路和测磁仪表	198	第二节 金属热电阻及其接口技术	238
第七章 气敏、湿敏传感器及其 接口技术	200	一、铂电阻	238
第一节 气敏传感器分类	200	二、铜电阻	239
第二节 气敏电阻的工作机理及结构	201	三、线性化电桥式测温电路	239
一、气敏电阻的工作机理	201	四、铂电阻直接测量温差电桥电路	240
二、气敏电阻的结构	202	五、4~20mA 电流电路 AD693	241
三、气敏电阻的主要参数	203	第三节 电容传感器及其接口技术	246
第三节 电压控制型气敏传感器	204	一、电容传感器的原理	246
一、氢气敏传感器的结构和 工作原理	204	二、差动式电容传感器的二极管环形 检波电路	247
二、氢气敏传感器的特性	205	三、电容式液位计	248
第四节 气敏传感器接口技术	206	四、差动脉冲宽度调制电路	250
一、利用 CMOS 的瓦斯检测器	206	第四节 光纤传感器及其接口技术	252
二、热敏电阻式热导率气体 传感器电路	207	一、光纤导光基本原理	252
三、防爆式 FB-4 型可燃性气体 报警器	210	二、光纤传感器及其分类	254
四、连续监测式氢气检测仪	210	三、光纤传感器的主要元器件	256
第五节 湿度的表示方法及湿敏器件的 特性参数	213	四、辐射(红外)型光纤温度传感器	259
一、湿度的表示方法	213	五、光纤传感器的输出光/脉冲变换电路	260
二、湿敏器件的特性参数	213	六、光纤传感器的形状检测电路	262
第六节 各种湿敏器件的结构 及特性	214	第五节 超声波传感器及其发送与接收技术	263
一、烧结型半导体陶瓷 湿敏器件	214	一、超声波传感器的结构、工作原理 及分类	263
		二、超声波传感器接口电路	266
		三、物体探测电路	270
		四、AE 传感器电路	272
		五、超声波探伤和传感器电路	273
		第九章 传感器与微机的接口技术	276
		第一节 检测控制系统	276

第二节 单片机及其系统	277	传感器	295
一、MCS-51 单片机结构及功能	277	六、数字脉冲式传感器	295
二、定时/计数器及中断控制字	281	七、数字编码式传感器	295
三、单片机应用系统分类	282	八、模拟电压放大及采样	297
四、单片机应用系统设计	284	九、智能化接口	298
第三节 输入接口	289	第四节 输出接口	299
一、传感器输出方式分类	289	一、显示、记录输出接口	299
二、开/关式传感器	290	二、驱动控制装置接口	300
三、模拟脉冲式传感器	293	第五节 应用实例	300
四、模拟连续式传感器	294	一、简单实用的湿度监控仪	300
五、模拟频率变化式和脉冲重复频率式		二、智能温度测控器	302

第一章 传感器接口技术电路基础

在这一章，我们主要介绍处理传感器信号用的基本放大、滤波、比较和波形发生电路、信号拾取的主要方法以及信号处理的部分基本方法。其中包括测量放大器、滤波器、电压比较器、波形发生器、电压源和电流源、桥路分析、桥路信号的拾取、信号传送方式、模数转换和数字显示。

第一节 放大、滤波、比较和波形发生电路

传感器(敏感元件)拾取的信号，往往比较微弱，存在着非线性，并随温度而变化。由于信号比较微弱，可能含有不能忽略的噪声；为了得到和处理传感器拾取的信号，有时还需要产生某种波形，或者将传感器的信号与某一基准值进行比较。因此，在这里简要介绍传感器接口电路常用的放大、滤波、比较和波形发生电路。

一、测量放大器

传感器接口电路常用的放大器，除了通用放大器外，还有各种各样的专用放大器。我们只介绍后者。

这里所谓的测量放大器是指与通用运放相比有较高的共模抑制比，适于弱信号检测的专用放大器。一般采用通用运放进行弱信号放大，尽管有较高的共模抑制比($CMRR > 100\text{dB}$)，但这种抑制能力仅对直接输入到差动端的共模信号有效，而对分别加到运放的同相端 V_{IN+} 和反相端 V_{IN-} 的干扰信号是不能起到很好的抑制作用的。由于通用运放不易满足现场的要求，因此在很多情况下需要采用测量放大器来实现弱信号放大的任务。因为测量放大器只对输入端的差值放大，所以放大器如果工作在共模干扰的方式，并且 $V_{IN+} = V_{IN-} = V_{CM}$ ，则放大器的输出将为零。测量放大器具有较高的输入阻抗、较低的失调电压和温度漂移、稳定的放大系数和低的输出阻抗等优点，目前已广泛地应用于自动检测系统中，如用于应变电桥、热电偶、生物电信号及其它弱信号的检测。

测量放大器的结构原理如图 1.1.1 所示。两个差动输入端(V_{IN+} 、 V_{IN-})直接与信号源相连，外接的电阻 R_C 用于调整放大倍数， R_S 可对放大倍数进行微调。输出电压信号是测量端 S 与参考端 R 之间的电位差。

测量放大器的原理图如图 1.1.2 所示。它由 3 个运放 A_1 、 A_2 和 A_3 组成。差动输入端 V_{IN+} 和 V_{IN-} 分别接到两个运放的同相输入端，因此输入阻抗很高。采用对称结构并允许信号直接加到输入端可以保证抑制共模信号的能力，电路放大倍数可由下式给出

$$K = \frac{V_{OUT}}{V_{IN+} - V_{IN-}} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{R_1 + R'_1}{R_G} \right) \quad (1.1.1)$$

测量放大器种类很多，下面介绍两种常用的测

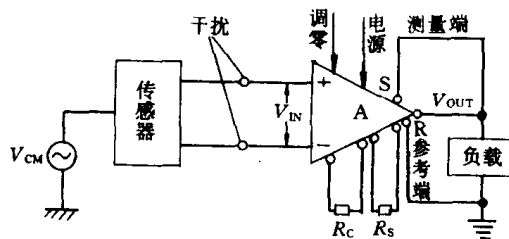


图 1.1.1 测量放大器结构图
(V_{CM} 为干扰源或接地点电压)

量放大器。

1. LH0036/LH0036C 测量放大器

LH0036/LH0036C 是一种理想的低功耗测量放大器，适用于差动信号放大，由于输入阻抗高达 $300\text{M}\Omega$ ，其共模抑制比可达 100dB ，增益可在 $1\sim 1000$ 范围内调节，工作电压范围为 $1\sim 18\text{V}$ 。图 1.1.3 是器件的内部电路。1 脚可用于频宽控制，通常是直接接地；2 脚在要求漏电流和输入电容极小的场合用作保护屏蔽端；在正常工作条件下 3 脚接地。在正常工作时 9 脚接地，这时可使共模抑制比大于 80dB ；8 脚也可以用于改善共模抑制比。

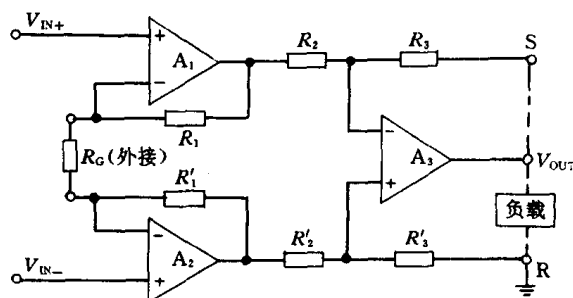


图 1.1.2 测量放大器原理图

图 1.1.4 是一个用 LH0036 测量放大器组成的热电偶温度测量系统。

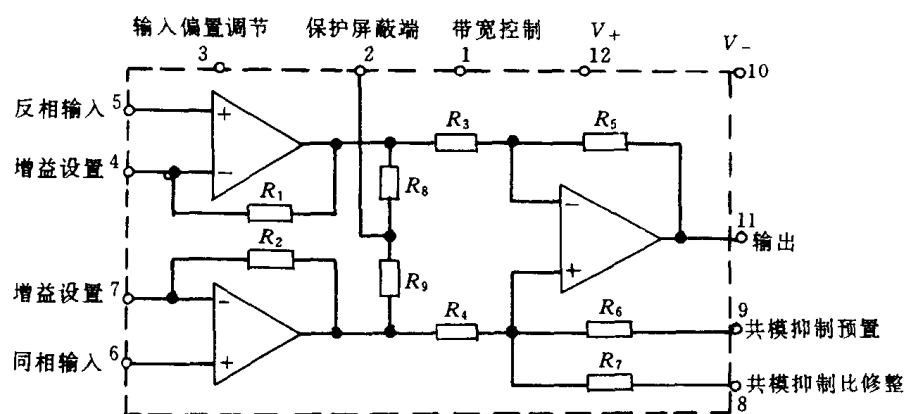


图 1.1.3 等效电路图

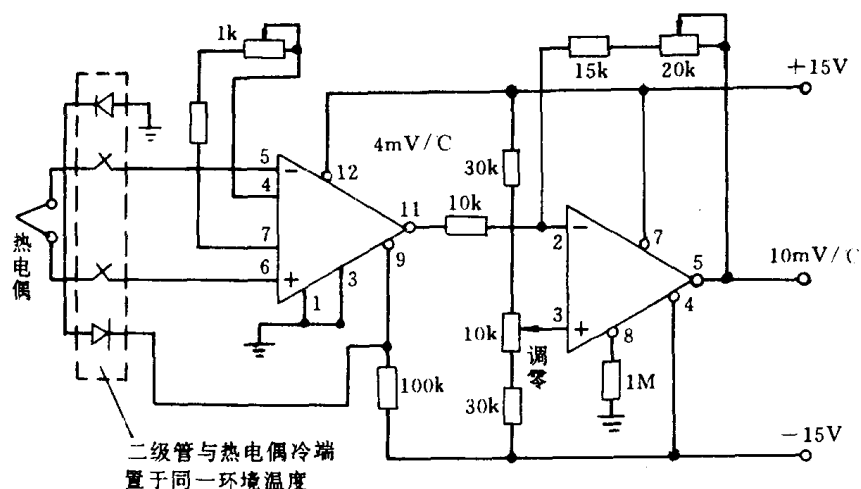


图 1.1.4 测量有冷端补偿的热电偶放大器

2. AD521/AD522 测量放大器

AD521 测量放大器的放大倍数可调范围为 $1\sim 1000$ ，输入阻抗为 $3\text{M}\Omega$ ，共模抑制比可达 120dB ，工作电压范围 $5\sim 18\text{V}$ ，放大倍数为 1 时的最高频率大于 2MHz 。图 1.1.5 为 AD521 电路的基本接法。这是一个与热电偶直接连接的例子，图中 4、6 两个脚用于调整放大器零点，

其放大倍数由电阻比 $K=R_s/R_G$ 决定。使用时应使输入端 1 或 3 脚与地线构成 4 路以保证放大器的偏置电流。

AD522 是单芯片集成精密测量放大器，其放大倍数可在 1~1000 范围内调整，当放大倍数为 100 时，其非线性度仅为 0.005%，共模抑制比可以大于 120dB，在 0.1~100Hz 频带内噪声的峰峰值为 1.5mV，工作电压范围为 5~10V。

在自动检测系统中，最常用的传感器转换电路是电桥电路，图 1.1.6 为 AD522 用作电桥放大器的例子。4 和 6 脚是放大器调零端，2 和 14 脚连接电阻 R_G 用于调整放大倍数。整个系统的输出由下式给出

$$E_o = \left(1 + \frac{200k\Omega}{R_G}\right) \left[(E_1 - E_2) - \left(\frac{E_1 + E_2}{2} \cdot \frac{1}{CMRR} \right) \right] \quad (1.1.2)$$

上式中， E_o 为系统输出电压； E_1 、 E_2 为桥输出电压(即放大器输入电压 E_{IN})。当 $CMRR \gg 1$ 时，则：

$$E_o = \left(1 + \frac{200k\Omega}{R_G}\right) E_{IN} \quad (1.1.3)$$

由上式可得放大倍数为

$$K = \frac{I_o}{I_{IN}} = 1 + \frac{200k\Omega}{R_G} \quad (1.1.4)$$

另外，该芯片与 AD521 不同，这里有一个数据地(13 脚)，它用于连接输入信号线的屏蔽层以减少外电场对输入信号的干扰。

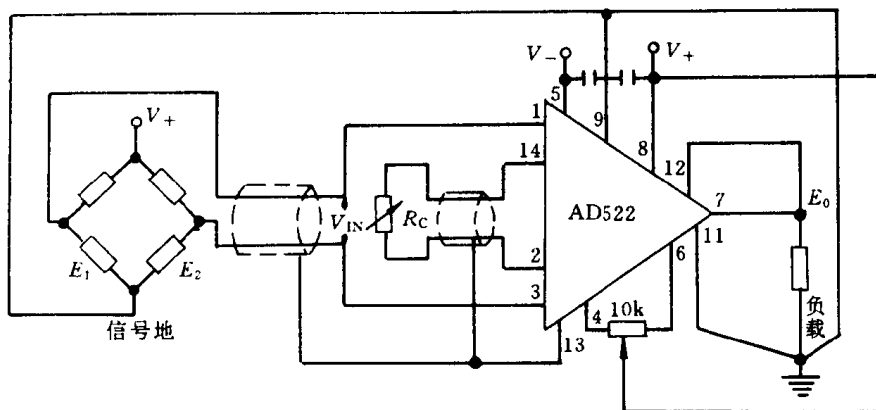


图 1.1.6 AD522 用于电桥信号放大

此外，传感器接口电路常用的放大器还有斩波稳零放大器(7650)、可编程放大器(3606)等，用时可查阅有关资料。

二、滤波器

在传感器拾取的信号中，可能含有大量的不能忽略的噪声(这些噪声可能是信号本身含有的，也可能是外部引入的)，或者输入信号调制一个交流信号，因此，必须解调。这都需要

滤波。

滤波电路的功能是让指定频段的信号能比较顺利地通过,而对其它频段的信号起衰减作用。

由于分类方法的不同,滤波器有各种各样的。根据滤波电路所处理的信号是连续变化的还是离散的,可分为模拟滤波电路和数字滤波电路;按所采用的是无源元件还是有源元件,可分为无源滤波电路和有源滤波电路;按幅频特性的不同,滤波电路可分为低通滤波电路、高通滤波电路、带通滤波电路、带阻滤波电路和全通相移滤波电路(它能使所有频率的信号通过,增益为常数,而相位是频率的函数)。

1. 低通滤波器(LPF)

图 1.1.7(a)所示的是一个一阶低通滤波器,图(b)是其幅频特性。现在我们来分析它的功能。

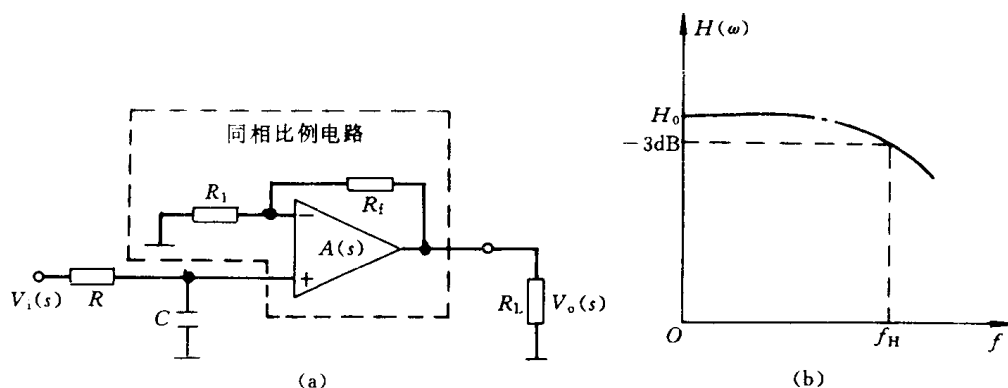


图 1.1.7 一阶低通滤波器及其幅频特性

低通滤波器的通带电压放大倍数定义为 $f=0$ 时输出电压与输入电压之比。对于直流而言,图 1.1.7(a)电路中的电容相当于开路,因此,它的通带电压放大倍数就是同相比例电路的电压放大倍数,即

$$A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (1.1.5)$$

由图 1.1.7(a)电路可知,输出电压与运放同相端电位的关系是

$$V_o(s) = A_{up} V_+(s) \quad (1.1.6)$$

而 $V_+(s)$ 与输入电压的关系是

$$V_+(s) = \frac{1}{1 + sCR} V_i(s) \quad (1.1.7)$$

由以上两式可得该电路的传递函数是

$$A_u(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + sCR} A_{up} \quad (1.1.8)$$

因为式中 s 是一次的,所以称该传递函数是一阶的,该传递函数所描述的滤波电路为一阶滤波电路。该电路的通带上截止频率为

$$\omega_H = 2\pi f_H = \frac{1}{RC} \quad (1.1.9)$$

或者

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.1.10)$$

利用(1.1.8)式可以画出一阶 RC 有源低通滤波器的归一化幅频特性曲线,如图 1.1.7 (b)所示。传输函数中只有一个极点,在 $\omega=\omega_H$ 时,增益下降 3dB, $f_H=1/2\pi RC$ 称为上截止频率。

理想状态下,要求 $f>f_H$ 时,滤波器的输出应为零。而一阶低通滤波器带外增益以 $-20\text{dB}/10$ 倍频程下降,滤波效果不够好。于是出现了高阶滤波器,例如一五阶低通滤波器,其带外增益以 $-100\text{dB}/10$ 倍频程下降。

一阶滤波器电路简单,有一定的滤波作用,在一些场合获得应用。但总的来说,其滤波特性不够好,在要求滤波器频率特性曲线边缘更为陡峭的场合,可以采用高阶滤波器。偶次高阶滤波器可由二阶滤波器串联组成,奇次高阶滤波器可由二阶和一阶滤波器串联而成。

简单的二阶低通滤波器电路如图 1.1.8 所示。该电路的通带电压放大倍数仍为式(1.1.5)。由图 1.1.8 可列出下列方程

$$V_o(s) = A_{up} V_+(s) \quad (1.1.11)$$

$$V_M(s) = \frac{\frac{1}{sC} \parallel \left(R + \frac{1}{sC}\right)}{R + \left[\frac{1}{sC} \parallel \left(R + \frac{1}{sC}\right)\right]} V_i(s) \quad (1.1.12)$$

$$V_+(s) = V_M(s) \frac{1}{1+sCR} \quad (1.1.13)$$

解得图 1.1.8 电路的传递函数

$$A_u(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{up}}{1+3sCR+(sCR)^2} \quad (1.1.14)$$

可见其传递函数是二阶的,因此,图 1.1.8 的电路是二阶低通滤波器。

2. 高通滤波器(HPF)

简单的高通滤波器电路如图 1.1.9(a)所示。因频率较高, C 可视为短路,所以,该电路的通带放大倍数仍如式(1.1.5)。由图可知,

$$V_o(s) = A_{up} V_+(s) \quad (1.1.15)$$

$$\begin{aligned} V_+(s) &= \frac{R}{\frac{1}{sC} + R} V_i(s) \\ &= \frac{sCR}{1+sCR} V_i(s) \end{aligned} \quad (1.1.16)$$

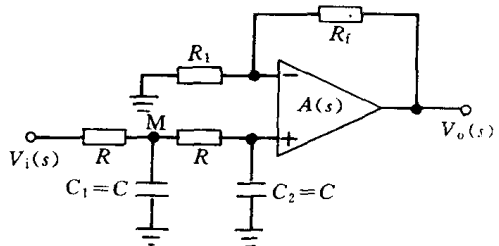


图 1.1.8 简单的二阶 LPF

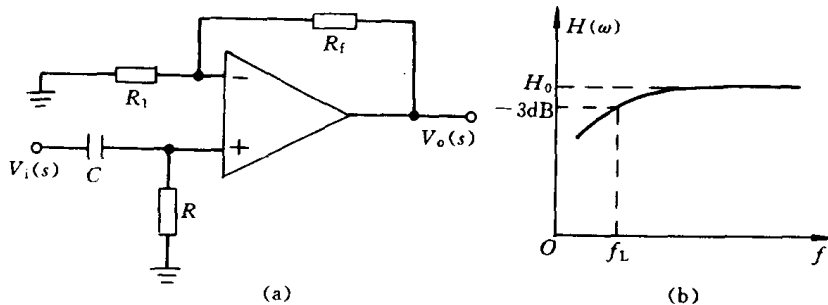


图 1.1.9 简单的高通滤波器及其幅频特性

解得高通滤波器电路的传递函数为

$$\begin{aligned}
 A_u(s) &= \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \\
 &= \frac{sCR}{1+sCR} A_{up}
 \end{aligned} \quad (1.1.17)$$

一阶 RC 有源高通滤波器的归一化幅频特性如图 1.1.9(b) 所示。该电路的带外增益以 +20dB/10 倍频程上升, 滤波效果也不好。该电路的下截止频率为

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.1.18)$$

二阶的压控电压源高通滤波器如图 1.1.10 所示。它的传递函数为

$$A_u(s) = \frac{A_{up}}{1 + (3 - A_{up}) \frac{1}{sCR} + \left(\frac{1}{sCR}\right)^2} \quad (1.1.19)$$

即

$$A_u(s) = \frac{(sCR)^2}{1 + (3 - A_{up})sCR + (sCR)^2} A_{up} \quad (1.1.20)$$

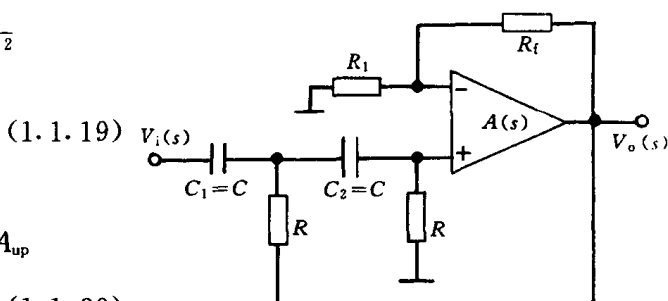


图 1.1.10 二阶压控电压源高通滤波器电路

3. 有源带通滤波器

有源带通滤波器可以由有源低通滤波器和有源高通滤波器组合成。图 1.1.11 所示的是一阶有源带通滤波器电路及其幅频特性。由图得传递函数的表达式

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{(1 + sR_2C_2) \left(1 + \frac{1}{sR_1C_1}\right)}$$

令

$$\omega_L = \frac{1}{R_2C_2}, \quad \omega_H = \frac{1}{R_1C_1}$$

则

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{\omega_L}\right) \left(1 + \frac{\omega_H}{s}\right)} \quad (1.1.21)$$

或

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_L}\right) \left(1 - j \frac{\omega_H}{\omega}\right)} \quad (1.1.22)$$

其幅频特性如图 1.1.11(b) 所示。图中 $f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_2C_2}$ 称为带通滤波器的下限频率, $f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1C_1}$ 称为上限频率。两者之差称为带通滤波器的带宽, 用 B 来表示

$$B = f_H - f_L \quad (1.1.23)$$

图 1.1.12(a) 所示为二阶有源带通滤波器电路, 计算得

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{sA_{up}/R_1C_2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_3C_2} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1-A_{up}}{R_2C_2}\right)s + \frac{1}{R_3C_1C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \quad (1.1.24)$$

如果令

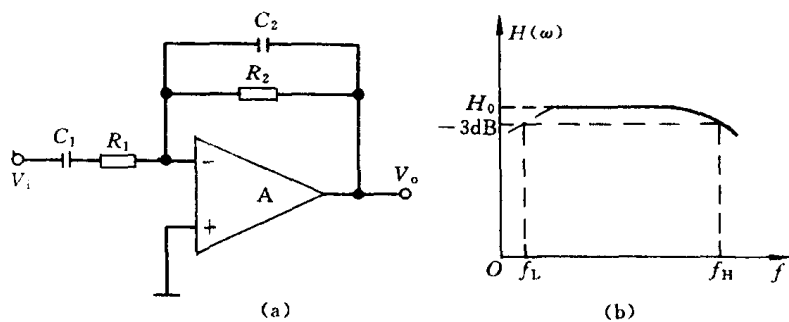


图 1.1.11 一阶有源带通滤波器及其幅频特性

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C_1 C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

带内最大增益 H_0

$$H_0 = \frac{A_{up}}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} + \frac{R_1}{R_2} (1 - A_{up})}$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2}} \left[\sqrt{\frac{C_2}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} + \sqrt{\frac{C_1}{C_2} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{1 - A_{up}}{R_2} \right)} \right]$$

则

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{H_0 \omega_0 s / Q}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (1.1.25)$$

带通滤波器的幅频特性如图 1.1.12(b) 所示。

在带通滤波器中, ω_0 为中心频率, 频带宽度 B 是带通滤波器的一个主要参数, 其定义为

$$B = \omega_2 - \omega_1 \quad (1.1.26)$$

它由下式求出

$$B = \frac{\omega_0}{Q} \quad (1.1.27)$$

可见, 在 ω_0 确定以后, Q 越高, 频带就越窄, 滤波效果也就越好。

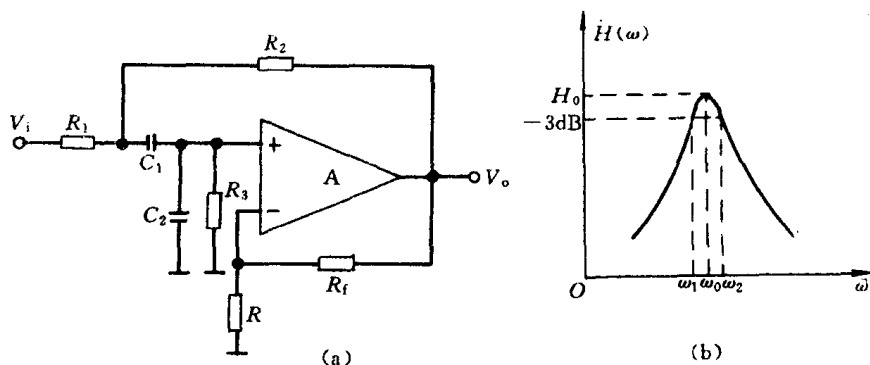


图 1.1.12 二阶有源带通滤波器及其幅频特性

三、电压比较器

电压比较器的功能是比较两个电压的大小, 例如, 将一个信号电压 V_i 和另一个基准电压 V_R 进行比较, 在 $V_i > V_R$ 和 $V_i < V_R$ 两种不同情况下, 电压比较器输出两个不同的电平, 即低电平和高电平。而 V_i 变化经过 V_R 时, 比较器的输出将从一个电平跳变到另一个电平。图

1.1.13 画出了一种简单的电压比较器的传输特性，其中 V_{OH} 和 V_{OL} 分别是电压比较器输出的高电平和低电平。

实现图 1.1.13(a) 功能的简单电路如图 1.1.13 (b) 所示。只要反相输入端的电位高于同相输入端的电位，即 $V_- > V_+$ ，则 V_O 为低电平；反之，若 $V_- < V_+$ ，则 V_O 为高电平。

比较器的输出电压从一个电平跳变到另一个电平的临界条件是集成运放两个输入端的电位相等，即 $V_+ = V_-$ 。对于图 1.1.13(b) 电路， $V_- = V_I$ ， $V_+ = V_R$ ，所以该电压比较器的传输特性就是图 1.1.13 (a) 中的曲线。它表明输入电压从低逐渐升高经过 V_R 时， V_O 将从高电平跳变为低电平。相反，当输入电压从高电平逐渐降低经过 V_R 时， V_O 将从低电平跳变为高电平。比较器的输出电压从一个电平跳变到另一个电平时对应的输入电压值，称为阈值电压。

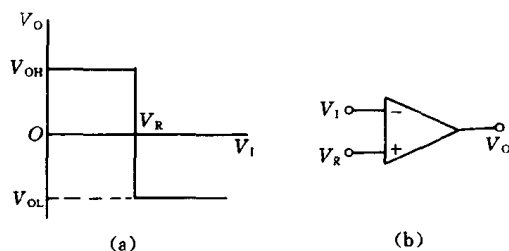


图 1.1.13 简单电压比较器的传输特性及电路

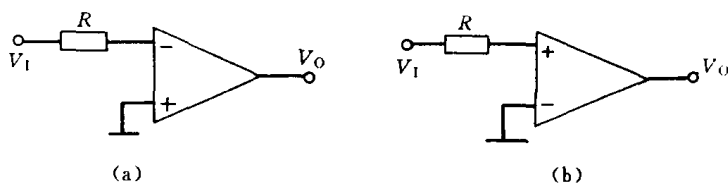


图 1.1.14 过零比较器

(a) 反相输入过零比较器；(b) 同相输入过零比较器

1. 过零电压比较器

有时，需要将信号电压与零进行比较，即基准电压等于零，满足该要求的电路如图 1.1.14 所示。图中的 R 是为了避免 V_I 过大损坏器件而设置的。显然在理想情况下，它的阈值是零，也就是说 V_I 变化经过零时输出电压从一个电平跳变到另一个电平，因此，称为过零比较器。

2. 滞回电压比较器

图 1.1.15 为同相滞回电压比较器。它实际上是正反馈放大器。由图可见，该比较器有两个阈值与输出端在状态转换前是高电平还是低电平有关。

现在，我们来求它的阈值。参看图 1.1.16(a)，它是一个反相滞回比较器。由图可见，它的输出电压发生跳变的临界条件是集成运放两个输入端之间的电压等于零，即

$$V_- = V_+$$

而在 $V_- = V_+$ 时，集成运放两个输入端的电流均可视为零，因此，运放反相输入端的电位等于输入电压，即

$$V_- = V_I \quad (1.1.28)$$

而同相输入端的电位是

$$V_+ = V_R - \frac{V_R - V_O}{R_2 + R_3} \cdot R_2 = \frac{R_3 V_R + R_2 V_O}{R_2 + R_3}$$

$$(1.1.29)$$

因为 $V_- = V_+$ 时对应的 V_I 值就是阈值，故由 (1.1.28) 和 (1.1.29) 式可知，图 1.1.16(a) 电路的阈值是

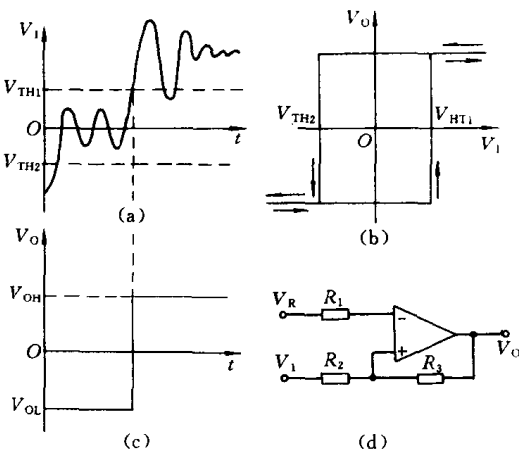


图 1.1.15 同相滞回比较器

(a) 输入电压波形；(b) 传输特性；
(c) 输出电压波形；(d) 同相输入滞回比较器

$$V_{TH} = \frac{R_3 V_R + R_2 V_O}{R_2 + R_3} \quad (1.1.30)$$

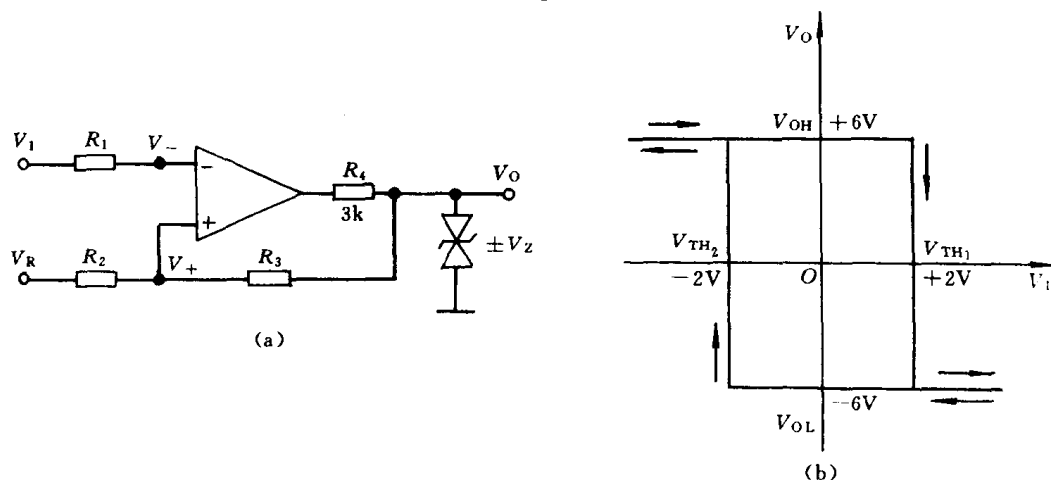


图 1.1.16 反相滞回比较器

(a)反相滞回比较器电路；(b)反相滞回比较器的传输特性

式中 V_O 的值是输出高电平 ($+V_Z$) 或输出低电平 ($-V_Z$)，故将 $V_O = +V_Z$ 和 $V_O = -V_Z$ 分别代入上式，可得两个不同的阈值，它们分别是

$$V_{TH1} = \frac{R_3 V_R + R_2 V_Z}{R_2 + R_3} \quad (1.1.31)$$

$$V_{TH2} = \frac{R_3 V_R - R_2 V_Z}{R_2 + R_3} \quad (1.1.32)$$

3. 窗口电压比较器

前面介绍的滞回比较器，当 V_I 单方向变化时， V_O 只跳变一次，因而只能检查一个电平。如果要判断 V_I 是否在某两个电平之间，则应采用窗口比较器。

图 1.1.17 是一种窗口电压比较器。由图可见，当输入电压单方向变化时，可使输出电压跳变两次。下面说明它的工作原理。

(1) 当 $V_I > V_{RH}$ 时， V_{O1} 为高电平，二极管 D_1 导通。由于 $V_{RL} < V_{RH}$ ，因此， V_I 也大于 V_{RL} ，但 A_2 采用反相输入接法，所以， V_{O2} 为低电平(负值)，二极管 D_2 截止。也就是说，在这种情况下的图 1.1.17(a)窗口电压比较器的输出 $V_O = V_{O1}$ ，为高电平。

(2) 当 $V_I < V_{RL}$ 时， V_{O2} 为高电平，二极管 D_2 导通。由于 $V_{RL} < V_{RH}$ ，因此， V_I 也小于 V_{RH} ， V_{O1} 为低电平(负值)，二极管 D_1 截止。也就是说，在这种情况下，图 1.1.17(a)窗口电压比较器输出 $V_O = V_{O2}$ ，为高电平。

(3) 当 $V_{RL} < V_I < V_{RH}$ 时， V_{O1} 和 V_{O2} 均为低电平，二极管 D_1 和 D_2 都截止，此时，图 1.1.17(a)中的 M 点相当于开路，所以， $V_O = 0$ ，即窗口电压比较器输出为低电平。

根据上述分析，图 1.1.17(a)窗口比较器有两个阈值，它们是 V_{RH} 和 V_{RL} 。而且，当 $V_I < V_{RL}$ 或 $V_I > V_{RH}$ 时， V_O 均为高电平，仅当 $V_{RL} < V_I < V_{RH}$ 时， V_O 为低电平。因此，该窗口比较器的传输特性如图 1.1.17(b)所示。

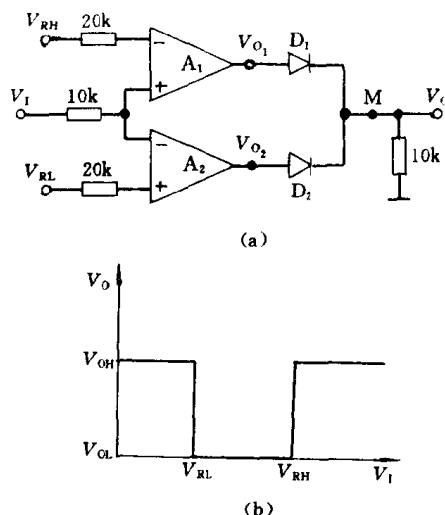


图 1.1.17 窗口比较器

(a)电路图；(b)传输特性

四、波形发生器

1. RC 串并联正弦振荡电路

由运放构成的 RC 串并联正弦振荡电路如图 1.1.18 所示。由图

$$\dot{V}_+ = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + (R // \frac{1}{j\omega C})} \dot{V}_o \quad (1.1.33)$$

所以,

$$\frac{\dot{V}_+}{\dot{V}_o} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})} \quad (1.1.34)$$

当 $\omega RC = \frac{1}{\omega RC}$, 相移为零, 此时的工作频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.1.35)$$

而

$$\frac{\dot{V}_+}{\dot{V}_o} = \frac{1}{3} \quad (1.1.36)$$

由此, 我们选

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (1.1.37)$$

略大于 3, 即 R_f 略大于 $2R_1$, 该电路即能产生相移为零的正弦波。其振荡频率为 f_0 。

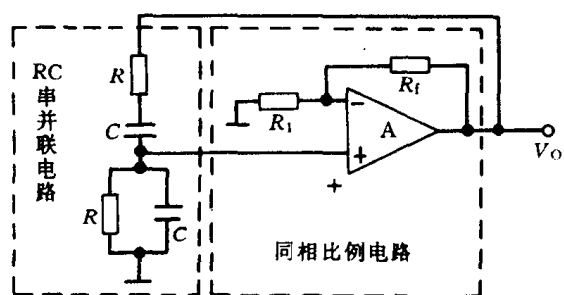


图 1.1.18 RC 串并联正弦振荡电路

2. 石英晶体正弦振荡电路

石英晶体作为选频元件, 构成的正弦波振荡电路, 其振荡频率的稳定度优于 0.001%。

石英晶体谐振器的符号、等效电路和电抗频率特性如图 1.1.19 所示。其中

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1.1.38)$$

$$f_p \approx f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} \quad (1.1.39)$$

式中 C_0 为静电电容, 石英晶体的机械振动的惯性用电感 L 等效, 晶片振动时因摩擦而造成的损耗用 R 来等效。

(1) 并联石英晶体正弦波振荡电路: 振荡频率高度稳定的并联石英晶体正弦振荡电路如图 1.1.20 所示。

(2) 串联石英晶体正弦被振荡电路: 当 $f = f_s$ 时, 石英晶体呈纯电阻性, 相移为零, 其正弦波振荡电路如图 1.1.21 所示。

3. 矩形波发生器

图 1.1.22 为方波发生器电路。它的右边为滞回比较器, 起开关作用; 它的左边是 RC 电路, 起反馈和延迟作用。