

高频电子技术

(第2版)

主 编 张建国

副主编 林 蔚 沈炎松 吴艳红

孙玉珍 霍英杰



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前言

Preface

为了适应现代电子技术飞速发展的需要,适应高等教育教学的要求,更好地培养应用型、技能型高级电子技术人才,在多年教学改革与实践的基础上,以培养学生综合应用能力为出发点编写了本教材。本教材可作为高等院校电子类、通信类、无线电技术类专业的“高频电子技术”课程的教材,也可供从事电子技术工作的技术人员参考。

高频电子技术的研究对象是高频信号产生、发射、接收和处理的有关电路,主要解决无线电广播、电视和通信中发射与接收的有关技术问题。所以“高频电子技术”课程是高等院校电子信息类专业的一门主干专业基础课程,它涵盖了通信和电子电路的主要内容,在电子信息类专业中占有基础性的地位,同时也是一门工程性和实践性很强的专业基础课程,随着现代通信技术和无线电技术的发展,高频电子技术的教学内容不断充实、教学体系不断更新。目前高频电子技术理论仍在不断充实与发展,已越来越多地应用到其他学科领域。

“高频电子技术”也是一门应用性很强的技术基础课程,主要任务是在传授有关高频电子技术基本知识的基础上,培养分析和应用高频电路的能力。本教材根据高校学生的学习规律,在内容的编写上力求通俗易懂,在内容的处理上符合高等院校教学的原则。

本教材共分7章。第1章讲解通信技术基本知识,主要介绍高频电子技术在无线电通信系统中的作用和地位,并简单介绍了无线电信号的一些基础知识和基本概念。第2章到第7章分别介绍各种功能电路,即高频小信号谐振放大器的应用、高频功率放大器的应用、正弦波振荡器的应用、振幅调制解调器及混频器的应用、角度调制解调器的应用、反馈控制电路的应用等。在内容选取和安排上,编写时突出基本概念、基本理论和基本方法及基本技能,主要讲述分析和应用的方法,不追求系统性和完整性。为便于读者学习,着重讲清思路,交代方法,每章都有小结、思考与练习题,以帮助学生复习和巩固所学知识。

本课程是一门实践性很强的专业课,应加强课程的实验与实训。为强化学生职业能力的培养和训练,在本书各章都配备了相应的实训和综合实训内容。本课程的参考学时数为90学时(含技能训练)。

本教材由张建国、林蔚、沈炎松、吴艳红、沈梅香、黄燕琴、林隽生、孙玉珍、霍英杰共同编写。本教材由张建国老师统稿并担任主编,林蔚、沈炎松、吴艳红、

孙玉珍、霍英杰担任副主编。在此对关心、帮助本书编写、出版、发行的各位同志一并表示感谢！

由于电子技术发展迅速，编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2018年3月

目 录

Contents

► 第1章 通信技术基本知识	1
1.1 通信与通信系统技术	1
1.1.1 通信系统的基本组成	1
1.1.2 无线电的发送与接收设备	2
1.2 无线电波的传播方式和频段划分	3
1.2.1 无线电波的传播方式	4
1.2.2 频段划分	5
1.2.3 调制特性	5
1.3 本课程的内容	5
1.4 技能训练1: 函数信号发生实训	6
本章小结	10
思考与练习题	10
► 第2章 高频小信号谐振放大器的应用	11
2.1 概述	11
2.2 小信号选频放大器	13
2.2.1 谐振回路	13
2.2.2 小信号谐振放大器	18
2.2.3 多级单调谐回路谐振放大器	22
2.3 集中选频放大器	24
2.4 放大器的噪声	26
2.4.1 电噪声	27
2.4.2 噪声系数	28
2.4.3 降低噪声系数的措施	31
2.5 技能训练2: 接收与小信号调谐放大实训	32
本章小结	36
思考与练习题	36
► 第3章 高频功率放大器的应用	40
3.1 谐振功率放大器	41

3.1.1 谐振功率放大器的工作原理	41
3.1.2 谐振功率放大器的特性分析	44
3.1.3 谐振功率放大器电路	50
3.2 宽带高频功率放大器	54
3.2.1 传输线变压器	54
3.2.2 功率合成技术	57
3.2.3 宽带高频功率放大器电路	57
3.3 倍频器	58
3.4 技能训练3：高频功率放大与发射实训	59
本章小结	62
思考与练习题	63
► 第4章 正弦波振荡器的应用	66
4.1 反馈型振荡器	66
4.1.1 反馈型振荡器的工作原理	66
4.1.2 平衡条件、起振条件和稳定条件	67
4.2 三点式LC振荡器	69
4.2.1 三点式振荡器的基本工作原理	69
4.2.2 电感三点式振荡器	70
4.2.3 电容三点式振荡器	71
4.2.4 改进型电容三点式振荡器	72
4.2.5 振荡器的频率稳定和振幅稳定	72
4.3 石英晶体振荡器	74
4.3.1 石英谐振器及其特性	74
4.3.2 石英晶体振荡器	75
4.4 RC正弦波振荡器	76
4.4.1 RC桥式振荡器	77
4.4.2 RC移相振荡器	78
4.5 集成电路振荡器	79
4.6 技能训练4：LC与晶体振荡器应用实训	79
本章小结	81
思考与练习题	82
► 第5章 振幅调制器、解调器及混频器的应用	85
5.1 信号变换概述	85
5.1.1 振幅调制	86
5.1.2 振幅解调	91

5.1.3 混频	92
5.2 振幅调制电路	93
5.2.1 模拟乘法器	93
5.2.2 双差分对管模拟乘法器	94
5.2.3 低电平调制电路	97
5.2.4 高电平调制电路	98
5.3 振幅解调电路	99
5.3.1 二极管包络检波电路	99
5.3.2 同步检波电路	102
5.4 混频电路	103
5.4.1 混频电路	104
5.4.2 混频过程中产生的干扰和失真	107
5.5 技能训练 5: 幅度调制与解调实训	109
本章小结	112
思考与练习题	113
► 第 6 章 角度调制器和解调器的应用	118
6.1 角度调制原理	118
6.1.1 调频信号与调相信号	118
6.1.2 调角信号的频谱与带宽	120
6.2 调频电路	123
6.2.1 直接调频电路	123
6.2.2 间接调频电路	126
6.2.3 扩展最大频偏的方法	127
6.3 角度调制和解调	128
6.3.1 鉴频的方法与特性	128
6.3.2 鉴频器的主要技术指标	129
6.3.3 斜率鉴频器	129
6.3.4 相位鉴频器	130
6.3.5 脉冲计数式鉴频器	134
6.3.6 限幅器	135
6.4 技能训练 6: 变容二极管调频器与相位鉴频器应用实训	137
本章小结	142
思考与练习题	143
► 第 7 章 反馈控制电路的应用	145
7.1 自动增益控制电路	146

7.1.1 自动增益控制的工作原理	146
7.1.2 自动增益控制电路	146
7.2 自动频率控制电路	148
7.2.1 工作原理	148
7.2.2 应用实例	148
7.3 自动相位控制电路（锁相环路）	149
7.3.1 锁相环路基本工作原理	149
7.3.2 锁相环路的数学模型	150
7.3.3 锁相环路的捕捉与跟踪	153
7.3.4 集成锁相环路	154
7.3.5 锁相环路的应用	156
7.4 频率合成器	158
7.4.1 频率合成器的主要指标	158
7.4.2 频率合成器的工作原理与应用	158
7.5 技能训练 7：接收部分的联试实训	162
7.6 技能训练 8：发送部分的联试实训	164
7.7 技能综合训练：收音机整机装配实训	165
本章小结	171
思考与练习题	172
 ► 附录 天煌 TKJPZ-1 型高频电子线路综合实训箱简介	173
 ► 参考文献	175

第 1 章

通信技术基本知识

学习目标

- (1) 理解通信系统的基本组成。
- (2) 掌握无线电波的传播方式和频段划分。
- (3) 理解本课程的特点。

能力目标

能够说明通信系统的组成和无线电发送和接收的工作过程。

1.1 通信与通信系统技术

高频电子技术是通信系统，特别是无线通信系统的技术基础，高频电路是无线通信设备的重要组成部分。通信的主要任务是传递信息，即将经过处理的信息从一个地方传递到另一个地方。

对信息传输的要求主要是提高可靠性和有效性。通信的目的是为了更有效、更可靠地传递信息，所以实用通信系统的实现需依靠三个方面的技术支持。第一，能将声音、文字、图像和数据等含有信息的具体表现形式与电信号进行相互转换的传感技术；第二，能对电信号进行加密、交换等处理的电信号处理技术；第三，能对电信号（或光信号）进行有效变换并切实传输的信息传送技术。

1.1.1 通信系统的基本组成

通信系统的基本组成框图如图 1-1 所示。它由输入/输出变换器、发送与接收设备以及信

道组成。输入变换器将要传递的声音或图像消息变换为电信号，该电信号包含了原始消息的全部信息（允许存在一定的误差或者说信息损失），称为基带信号。输入变换器的输出作为通信系统的信号源。

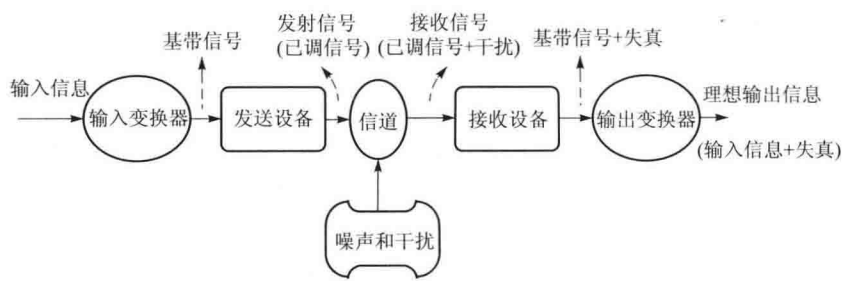


图 1-1 通信系统框图

图 1-1 中的发送设备和接收设备是直接为远距离信号传输提供技术支持的设备，基带信号是需要传送的信息信号，信道是信号传输的物理通路。基带信号可以通过电话机、电报机、话筒或摄像机等物体前端的“输入变换器”得到的输出电信号，也可以是数字终端或其他电子设备输出的电信号。

通信系统中的信道是信号传输的通道，也就是传输介质，不同的信道有不同的传输特性。为了适应信道对要传输信号的要求，就必须将已获取的基带信号再做变换，这就是发送变换设备的功用。发送设备将基带信号经过调制等处理，并使其具有足够的发射功率，再送入信道，实现信号的有效传输。常见的信道通常有光信道和电磁信道两类。人们通常将电磁信道分为无线信道和有线信道两类。无线信道是指无明显边界的电波传播空间，如无线通信的空间信号通路。有线信道是针对边界明显、空间范围相对较窄的信号传播通路，如有线通信用的架空明线、同轴电缆、视频电缆和波导管等。

1.1.2 无线电的发送与接收设备

通信系统的核心部分是发送设备和接收设备。不同通信系统的发送设备和接收设备的组成不完全相同，但基本结构有相似之处。人们经常见到的通信系统有广播通信系统和移动通信系统，它们都是无线通信系统。从发送设备到接收设备之间的无线电波的传播属于模拟通信系统，其组成结构基本相同。下面以无线广播系统为例来说明发送设备和接收设备的基本组成和工作原理。

1. 无线电调幅广播发送设备

图 1-2 所示为无线电调幅广播发送设备组成框图，图中画出了各部分输出电压的波形。

振荡器产生等幅的高频正弦信号，经过倍频器后将振荡器产生的高频信号频率成整数倍升高，即成为高频载波频率信号；调制放大器是由低频电压和功率放大级组成，用来放大话筒所产生的微弱信号，即基带信号，并送入调制器。然后，振幅调制器将输入的高频载波信号和低频调制信号变换成高频已调信号，即高频载波频率信号被基带信号调制。最后再经功率放大器放大，获得足够的发射功率，作为射频信号发送到空间。载波频率在适合无线信道传播的频率范围。

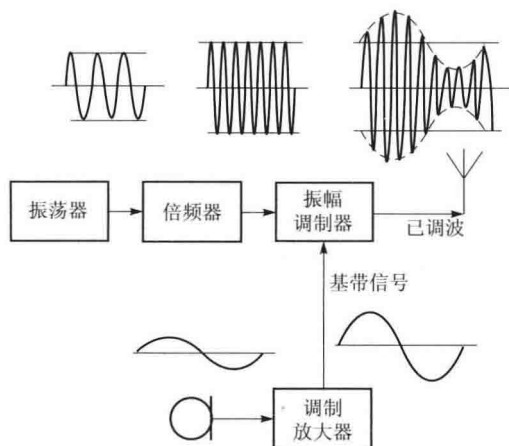


图 1-2 无线电调幅广播发送设备组成框图

2. 无线电调幅广播接收设备

图 1-3 所示为超外差式调幅接收机组成框图，图中画出了各部分输出电压的波形。

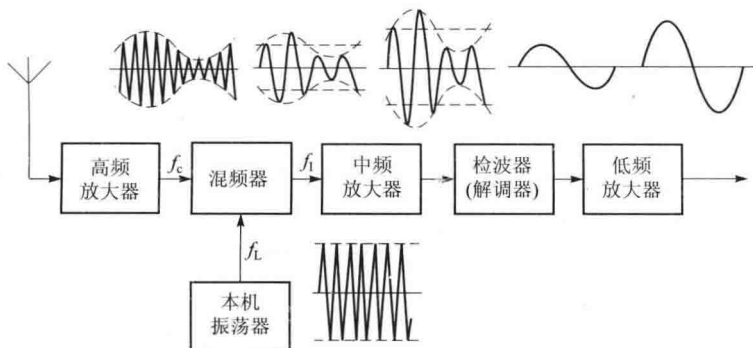


图 1-3 超外差式调幅接收机组成框图

超外差式调幅接收机的第一级是高频放大器。由于由发送设备发出的信号经过长距离的传播，产生很大的衰减，能量受到很大的损失，同时还受到传输过程中来自各方面的干扰和噪声。当到达接收设备时信号是很微弱的，因而需要经过放大器的放大，并且高频放大器的窄带特性同时滤除一部分带外的噪声和干扰。高频放大器的输出是载频为 f_c 的已调信号，经过混频器与本机振荡器提供的频率为 f_L 的信号混频，产生频率为 f_i 的中频信号。中频信号经中频放大器放大送到解调器，恢复原基带信号，再经低频放大器放大后输出。

高频放大器、中频放大器都是小信号谐振放大器，功率放大器是谐振功率放大器，调制器和解调器进行幅度调制、角度调制和它们的解调。上述电路以及振荡器、混频器都是本课程所讨论的重点。

1.2 无线电波的传播方式和频段划分

无线通信系统使用的频率范围很宽阔，从几十千赫兹到几十兆赫兹。习惯上按电磁波的

频率范围划分为若干个区段，称为频段或波段。无线电波在空间传播的速度 $c=3\times10^8\text{ m/s}$ ，则高频信号的频率 f 与其波长 λ 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中， f 的单位为 Hz； λ 的单位为 m。

1.2.1 无线电波的传播方式

传播特性指的是无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。无线电信号的传播特性主要根据其所处的频段或波段来区分。

电磁波从发射天线辐射出去后，不仅电波的能量会扩散，接收机只能收到其中极小的一部分，而且在传播过程中电波的能量会被地面、建筑物或高空的电离层吸收或反射，或者在大气层中产生折射或散射等现象，从而造成到达接收机时的强度大大衰减。根据无线电波在传播过程中所发生的现象，电波的传播方式主要有直射（视距）传播、绕射（地波）传播、折射和反射（天波）传播及散射传播等，如图 1-4 所示。决定传播方式和传播特点的关键因素是无线电信号的频率。

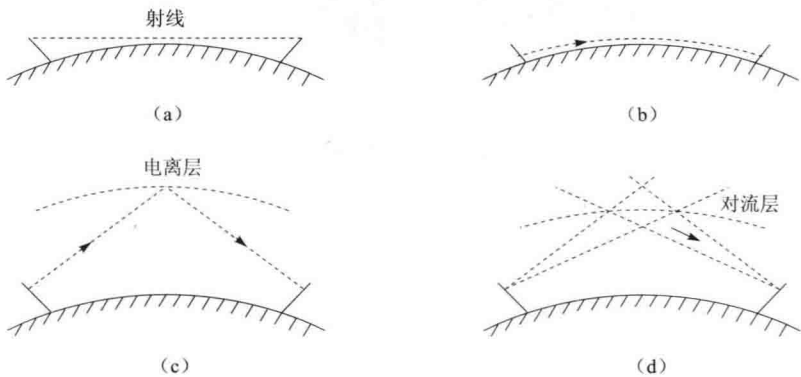


图 1-4 无线电波的主要传播方式

(a) 直射传播；(b) 地波传播；(c) 天波传播；(d) 散射传播

1. 地波传播（绕射波）

特点：波长越长，传播损耗越小。主要用于中、长波无线电通信和导航，如收音机接收的广播电台中波信号。

2. 视距传播（直射波）

特点：收、发信需要高架（高度比波长大得多）。主要用于超短波、微波波段的通信和电视广播，如卫星通信采用视距传播。

3. 天波传播（也称电离层传播（反射波））

特点：损耗小，传播距离远；因电离层状态不断变化使天波传播不稳定；因要满足从电离层返回地面的条件，工作频率受到限制。主要用于短波、中波的远距离通信和广播，如收音机接收的广播电台短波信号或军用短波电台。

1.2.2 频段划分

无线电波段可以按频率划分,也可以按波长划分。表 1-1 列出了按波长划分的波段名称、相应的波段范围及相应的频段名称。不过,波段的划分是粗糙的,各波段之间并没有明显的分界线,所以在各波段之间的衔接处无线电波的特性也无明显差异。

表 1-1 波段的划分

波段名称		波段范围	频率范围	频段名称
超长波		100~10 km	3~30 kHz	甚低频 VLF
长波		10~1 km	30~300 kHz	低频 LF
中波		1000~200 m	0.3~1.5 MHz	中频 MF
短波		200~10 m	1.5~30 MHz	高频 HF
超短波 (米波)		10~1 m	30~300 MHz	甚高频 VHF
微波	分类波	100~10 cm	0.3~3 GHz	特高频 UHF
	厘米波	10~1 cm	3~30 GHz	超高频 SHF
	毫米波	10~1 mm	30~300 GHz	极高频 EHF
	亚毫米波	1~0.1 mm	300~3 000 GHz	超极高频

1.2.3 调制特性

无线电传播一般都要采用高频(射频)的另一个原因就是高频适于天线辐射和无线传播。只有当天线的尺寸为可以与信号波长相比拟时,天线的辐射效率才会较高,从而以较小的信号功率传播较远的距离,接收天线也才能有效地接收信号。

调制就是用调制信号去控制高频载波的参数,使载波信号的某一个或几个参数(振幅、频率或相位)按照调制信号的规律变化。

根据载波受调制参数的不同,调制可分为三种基本方式,即振幅调制(调幅)、频率调制(调频)、相位调制(调相),分别用 AM、FM、PM 表示,还可以采用组合调制方式。

1.3 本课程的内容

1. 本课程的特点

高频电子技术是低频电子技术(模拟电子技术)的后续课程。从它处理的信号频率角度来说,发送和接收的信号都是高频信号。这是相对于需要传送信息的音频信号和视频信号来说的。称这些音频信号和视频信号为基带信号。基带信号的基本特点是其信号频谱是宽带的,即该信号频谱范围的上限频率和下限频率的差(即信号带宽),与其下限频率的比远大于 1。宽带信号包含大量低频信号的能量。

为了远距离地传送信号和接收信号就需要调制,这是一种频率变换。无线电波的发送设备和接收设备就是进行这种频率变换的设备。因此,在这些设备中,必定包含非线性的器件。

本教材阐述的各部分高频电子电路，除高频小信号谐振放大器外，都是非线性电路。相对于线性电子电路的分析方法来说，非线性电子电路的分析方法更加复杂，求解也困难得多。

2. 学习本课程的方法

- (1) 在学习本课程时，要抓住各种电路之间的共性，洞悉各种功能之间的内在联系，而不要局限于掌握一个个具体的电路及其工作原理。
- (2) 学习时要注意“分立为基础，集成为重点，分立为集成服务”的原则。
- (3) 重视实训环节，坚持理论联系实际，在实践中积累丰富的经验和技能。

1.4 技能训练 1：函数信号发生实训

1. 实训目的

- (1) 了解单片集成函数信号发生器 ICL8038 的功能及特点。
- (2) 掌握 ICL8038 的应用方法。

2. 实训内容

- (1) 高频实训箱的正确使用。
- (2) 输出正弦波的调整。
- (3) 输出三角波的观察。
- (4) 输出方波的观察。
- (5) 三种波段参数的比较。

3. 实训预习要求

参阅相关资料中有关 ICL8038 的内容介绍。

4. 实训知识

1) ICL8038 内部框图介绍

ICL8038 是单片集成函数信号发生器，其内部框图如图 1-5 所示。它由恒流源 I_2 和 I_1 、

电压比较器 A 和 B、触发器、缓冲器和三角波变正弦波电路等组成。

外接电容 C 可由两个恒流源充电和放电，电压比较器 A、B 的阈值分别为总电源电压(指 $U_{CC}+U_{EE}$)的 $2/3$ 和 $1/3$ 。恒流源 I_2 和 I_1 的大小可通过外接电阻调节，但必须满足 $I_2>I_1$ 。当触发器的输出为低电平时，恒流源 I_2 断开，恒流源 I_1 给 C 充电，它的两端电压 u_C 随时间线性上升，当达到电源电压的 $2/3$ 时，电压比较器 A 的输出电压发生跳变，使触发器输出由低电平变为高电平，恒流源 I_2 接通，由于 $I_2>I_1$ (设 $I_2=2I_1$)， I_2 将加到 C 上进行反充电，相当于 C 由一个净电流 I 放电， C 两端的电压 u_C

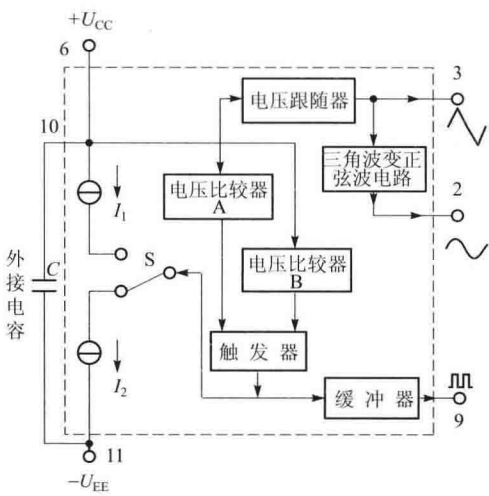


图 1-5 ICL8038 单片集成函数信号发生器内部框图

又转为直线下降。当它下降到电源电压的 $1/3$ 时, 电压比较器 B 输出电压便发生跳变, 使触发器的输出由高电平跳变为原来的低电平, 恒流源 I_2 断开, I_1 再给 C 充电, ……如此周而复始, 产生振荡。若调整电路, 使 $I_2=2I_1$, 则触发器输出为方波, 经反相缓冲器由引脚 9 输出方波信号。C 上的电压 u_C 上升与下降时间相等 (呈三角形) 时, 经电压跟随器从引脚 3 输出三角波信号。将三角波变为正弦波是经过了一个非线性网络 (正弦波变换器) 而得以实现的, 在这个非线性网络中, 当三角波电位向两端顶点摆动时, 网络提供的交流通路阻抗会减小, 这样就使三角波的两端变为平滑的正弦波, 从引脚 2 输出。

(1) ICL8038 引脚功能图, 如图 1-6 所示。

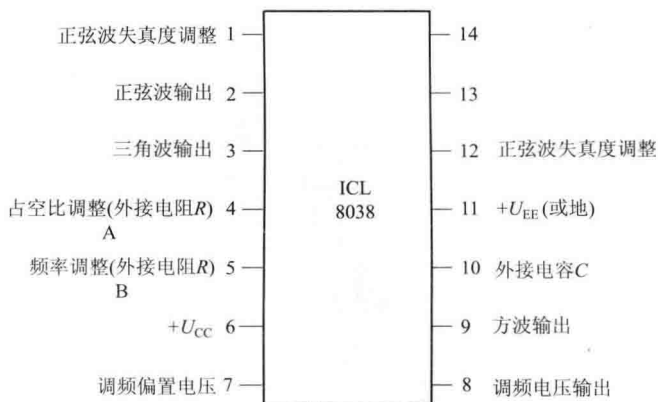


图 1-6 ICL8038 引脚排列

供电电压为单电源或双电源：单电源为 10~30 V；双电源为 $\pm 5 \sim \pm 15$ V。

(2) 实训电路原理图, 如图 1-7 所示。

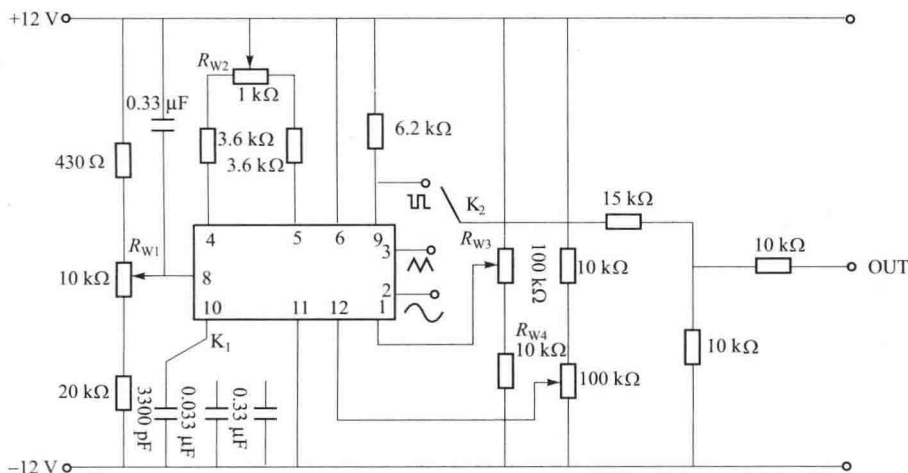


图 1-7 ICL8038 实训电路

其中 K_1 为输出频段选择波段开关, K_2 为输出信号选择开关, 电位器 R_{W1} 为输出频率细调电位器, 电位器 R_{W2} 调节方波占空比, 电位器 R_{W3} 、 R_{W4} 调节正弦波的非线性失真。

(3) 实际电路分析。ICL8038 的实际电路与图 1-7 基本相同, 只是在输出增加了一块 LF353 双运放, 作为波形放大与阻抗变换, 如图 1-8 所示。根据所选的电路元器件值, 本电

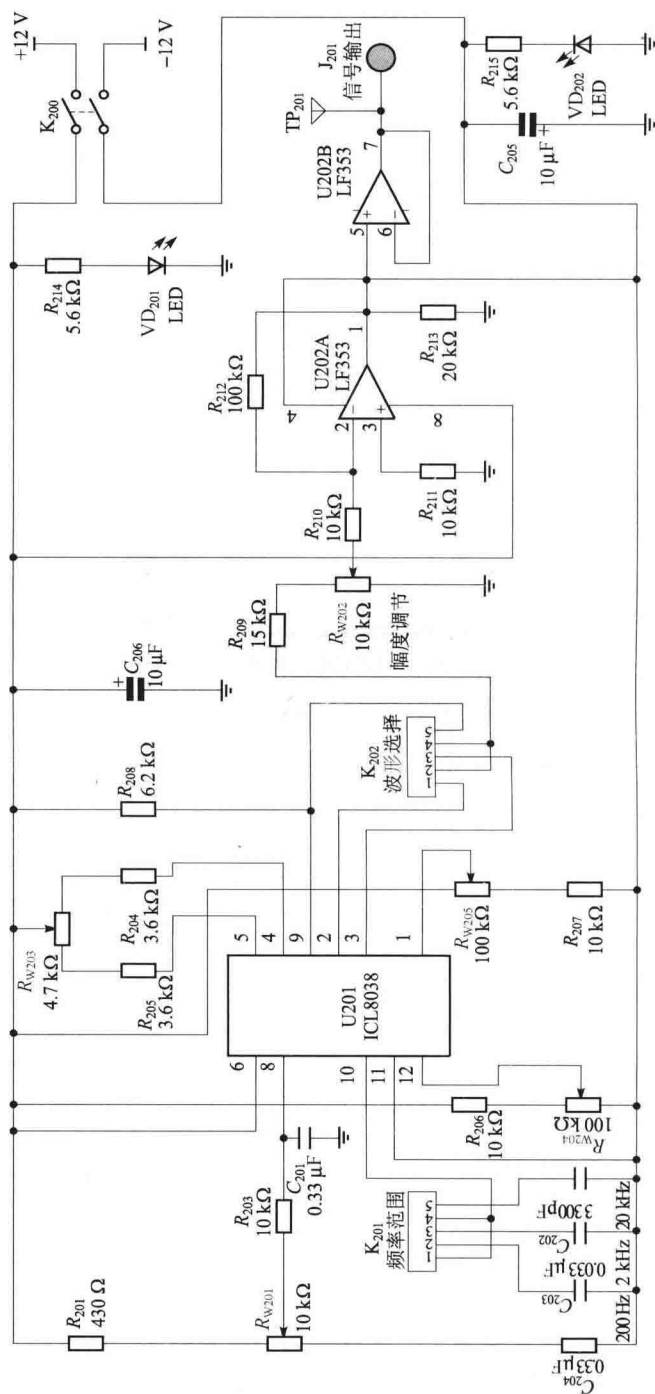


图 1-8 函数信号发生器实验电路原理图

路的输出频率范围为 10 Hz~11 kHz；幅度调节范围：正弦波为 0~12 V、三角波为 0~20 V、方波为 0~22 V。若要得到更高的频率，可适当改变三挡电容的值。

5. 实训仪器与设备

- (1) TKGpz-1 型高频电子线路综合实训箱。
- (2) 双踪示波器。
- (3) 频率计。
- (4) 交流毫伏表。

6. 实训内容与步骤

在实训箱上找到本次实训所用的单元电路，并与电路原理图相对照，了解各个切换开关的功能与使用。然后按前述的实训步骤开启相应的电源开关。

1) 输出正弦波的调整与测量

(1) 取某一频段的正弦波输出，用示波器观测输出端 (TP₂₀₁) 的波形。通过反复调节电位器 R_{W2} 、 R_{W3} 、 R_{W4} ，使输出正弦波的失真为最小。

(2) 用频率计和交流毫伏表分别测量三个频段的频率调节范围和各频段的输出频响特性 $U=f(f)$ ，将数据填入表 1-2 中。

表 1-2 数据记录表

频率 f/Hz										
电压 U/V										

① 从最低频段开始，调节频率细调电位器 R_{W1} ，测定本频段的频率调节范围和输出电压（在最高与最低频率之间选取若干点）。

- ② 切换到中间频段，重复①的步骤。
- ③ 切换到最高频段，重复①的步骤。

2) 观察输出的三角波信号

通过调节频率和幅度，观测输出的波形。

3) 观察输出的方波信号

- (1) 通过调节频率和幅度，观测输出的波形。
- (2) 通过调节 R_{W2} ，可以改变输出方波的占空比。

7. 实训注意事项

(1) 正弦波的波形调整是一项较细致的实训步骤，往往需要反复多次调整相关的电位器，以获得一个失真度最小的正弦波形。

(2) 经实训 3) 的第 (2) 项步骤后，要想重新恢复正弦波输出，则必须重新调整电位器 R_{W2} 。

8. 预习思考题

- (1) 如果采用单电源或不对称的双电源供电，对输出有何影响？
- (2) 本电路输出的最高频率与最低频率受哪些因素的影响？
- (3) 要想同时输出三种不同波形的信号，是否可能？如何实现？
- (4) 在实训的实际电路中后两级的运放有何作用？去除它行吗？

9. 实训报告

- (1) 作出各频段的频响特性曲线图。
- (2) 回答预习中的思考题。

本章小结

(1) 用电信号（或光信号）传输信息的系统称为通信系统，它由信源，输入输出变换器，发送与接收设备和信道组成。根据信道不同，可分为有线通信系统和无线通信系统。

(2) 为了改善系统性能，实现信号的有效传输及信道复用，通信系统中广泛采用调制技术。调制即用待传输的基带信号去改变高频载波信号的某一参数的过程。用基带信号去改变高频信号的幅度，称为调幅。基带信号也称为调制信号，未调制的高频信号称为载波信号，经调制后的高频信号称为已调信号。已调信号均占据一定的频带宽度。

(3) 通信设备中除了低频放大电路外，其他主要是处理高频信号的电路，有高频电压和功率放大电路、振荡电路以及调制、解调、混频、倍频电路等。



思考与练习题

- 1.1 画出无线通信收发信机的原理框图，并说出各部分的功用。
- 1.2 无线通信为什么要用高频信号？“高频”信号指的是什么？
- 1.3 无线通信为什么要进行调制？如何进行调制？
- 1.4 无线电信号的频段或波段是如何划分的？各个频段的传播特性和应用情况如何？