

GAOPINDIANZI
JISHU

高频电子 技术

主 编 张建国
副主编 吴宝琮 林 蔚

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高频电子技术

主 编 张建国
副主编 吴宝琮 林 蔚

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要包括绪论、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制解调及混频、角度调制与解调、反馈控制电路等。在内容选取和安排上突出基本概念、基本理论和基本方法,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,交待方法,每章都有小结、习题和思考题,以帮助学生复习和巩固所学知识。

本书可作为高等院校电子信息类专业的“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。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

高频电子技术/张建国主编. —北京:北京理工大学出版社, 2008.6
ISBN 978-7-5640-1538-1

I. 高… II. 张… III. 高频-电子电路 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 101578 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 12.25

字 数 / 245 千字

版 次 / 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

印 数 / 1~2000 册

定 价 / 22.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 周瑞红

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

高频电子技术的研究对象是产生、发射、接收和处理高频信号的有关电路,主要解决无线电广播、电视和通信中发射与接收高频信号的有关技术问题。“高频电子技术”课程是电子信息类专业的一门主干课程,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。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,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,主要任务是在讲授有关高频电子技术基本知识的基础上,培养学生分析和应用高频电路的能力。本教材根据学生的学习规律,在内容的编写上力求通俗易懂。

本书共分7章。第1章绪论,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:高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制解调及混频、角度调制与解调、反馈控制电路等。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,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,交待方法,每章都有小结、习题和思考题,以帮助学生复习和巩固所学知识。

为强化对学生动手能力的培养,在本书各章都配备了相应的实验实训内容。本课程的参考学时数为90学时(含实验实训)。

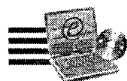
本书由张建国、吴宝琮、林蔚、沈梅香、吴艳红等老师共同编写。本书由张建国老师统编全稿,并由张建国老师担任主编,吴宝琮、林蔚老师担任副主编。本书全体编者对关心、帮助本书编写、出版、发行的各位同志一并表示谢意。

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

编者

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 通信与通信系统概述	(1)
1.1.1 通信系统的基本组成	(1)
1.1.2 无线电的发送设备与接收设备	(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	(3)
1.2.2 频段划分	(4)
1.2.3 调制特性	(5)
1.3 本课程的特点	(5)
1.4 实训1: 函数信号发生实验	(6)
本章小结	(10)
习题和思考题	(10)
第2章 高频小信号放大器	(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	(23)
2.3 集中选频放大器	(24)
2.3.1 集中选频滤波器	(25)
2.4 放大器的噪声	(27)
2.4.1 电噪声	(28)
2.4.2 噪声系数	(30)
2.4.3 降低噪声系数的措施	(33)
2.5 实训2: 接收与小信号调谐放大	(33)
本章小结	(37)
习题和思考题	(38)



第3章 高频功率放大器	(42)
3.1 谐振功率放大器	(42)
3.1.1 谐振功率放大器的工作原理	(42)
3.1.2 谐振功率放大器的特性分析	(47)
3.1.3 谐振功率放大器电路	(53)
3.2 宽带高频功率放大器	(57)
3.2.1 传输线变压器	(57)
3.2.2 功率合成技术	(60)
3.2.3 宽频带高频功率放大器电路	(61)
3.3 倍频器	(62)
3.4 实训3: 高频功率放大与发射	(63)
本章小结	(66)
习题和思考题	(68)
第4章 正弦波振荡器	(71)
4.1 反馈型振荡器	(71)
4.1.1 反馈型振荡器的工作原理	(71)
4.1.2 平衡条件、起振条件和稳定条件	(72)
4.2 三点式LC振荡器	(74)
4.2.1 三点式振荡器的基本工作原理	(74)
4.2.2 电感三点式振荡器	(75)
4.2.3 电容三点式振荡器	(76)
4.2.4 改进型电容三点式振荡器	(77)
4.2.5 振荡器的频率稳定和振幅稳定	(78)
4.3 石英晶体振荡器	(79)
4.3.1 石英谐振器及其特性	(80)
4.3.2 石英晶体振荡器	(81)
4.4 RC正弦波振荡器	(82)
4.4.1 RC桥式振荡器	(82)
4.4.2 RC移相振荡器	(84)
4.5 集成电路振荡器	(85)
4.6 实训4: LC与晶体振荡器	(85)
本章小结	(87)
习题和思考题	(88)



第5章 振幅调制、解调及混频	(91)
5.1 信号变换概述	(91)
5.1.1 振幅调制	(91)
5.1.2 振幅解调	(97)
5.1.3 混频	(98)
5.2 振幅调制电路	(99)
5.2.1 模拟乘法器	(99)
5.2.2 双差分对管模拟乘法器	(99)
5.2.3 低电平调制电路	(101)
5.2.4 高电平调制电路	(103)
5.3 振幅解调电路	(104)
5.3.1 二极管包络检波电路	(104)
5.3.2 同步检波电路	(106)
5.4 混频电路	(108)
5.4.1 混频电路	(109)
5.4.2 混频过程中产生的干扰和失真	(112)
5.5 实训5: 幅度调制与解调实验	(114)
本章小结	(118)
习题和思考题	(119)
第6章 角度调制和解调电路	(124)
6.1 角度调制原理	(124)
6.1.1 调频信号与调相信号	(124)
6.1.2 调角信号的频谱与带宽	(127)
6.2 调频电路	(129)
6.2.1 直接调频电路	(130)
6.2.2 间接调频电路	(133)
6.2.3 扩展最大频偏的方法	(135)
6.3 角度调制和解调	(135)
6.3.1 鉴频的方法与特性	(135)
6.3.2 鉴频器的主要技术指标	(136)
6.3.3 斜率鉴频器	(136)
6.3.4 相位鉴频器	(138)
6.3.5 脉冲计数式鉴频器	(142)



6.3.6 限幅器	(143)
6.4 实训6: 变容二极管调频器与相位鉴频器实验	(145)
本章小结	(151)
习题和思考题	(151)
第7章 反馈控制电路	(153)
7.1 自动增益控制电路	(153)
7.1.1 自动增益控制的工作原理	(153)
7.1.2 自动增益控制电路	(154)
7.2 自动频率控制电路	(155)
7.2.1 工作原理	(155)
7.2.2 应用实例	(156)
7.3 自动相位控制电路(锁相环路)	(157)
7.3.1 锁相环路基本工作原理	(157)
7.3.2 锁相环路的数学模型	(158)
7.3.3 锁相环路的捕捉与跟踪	(161)
7.3.4 集成锁相环路	(162)
7.3.5 锁相环路的应用	(164)
7.4 频率合成器	(166)
7.4.1 频率合成器的主要指标	(167)
7.4.2 频率合成器的工作原理与应用	(167)
7.5 实训7: 接收部分的联试实验	(171)
7.6 实训8: 发送部分的联试实验	(173)
7.7 综合实训: 收音机整机装配与调试	(175)
本章小结	(182)
习题和思考题	(182)
附录: 天煌 TKJPZ-1 型高频电子线路综合实验箱简介	(184)
参考文献	(186)

第 1 章 绪 论

1.1 通信与通信系统概述

高频电路是通信系统，特别是无线通信系统的基础，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/接收设备及信道组成。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，也即信息损失），称为基带信号。输入变换器的输出作为通信系统的信号源。

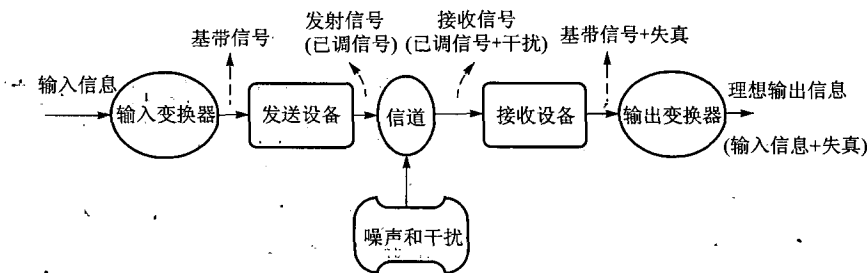
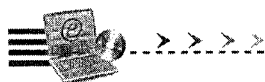


图 1-1 通信系统组成框图

图 1-1 中的发送设备和接收设备是直接为远距离信号流动提供技术支持的设备，基带信号是需要传送的信息信号，信道是信号流动的物理通路。基带信号本身可以通过电话机、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，也就是传输媒介，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作用。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 无线电的发送设备与接收设备

通信系统的核心部分是发送设备和接收设备。不同的通信系统的发送设备和接收设备的组成也不完全相同，但基本结构有相似之处。常见的通信系统有广播通信系统与移动通信系统，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，因此发送设备和接收设备的组成结构基本相同。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。

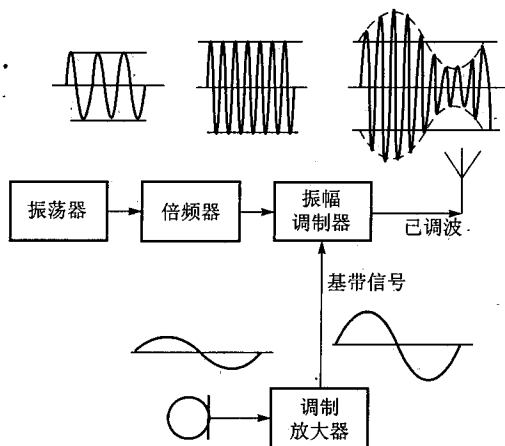


图 1-2 无线电调幅广播发送设备组成框图

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，即称为高频载波频率信号；调制放大器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，并将其送入振幅调制器。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。载波频率处在适合无线信道传播的频率范围内。

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。

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，同时在传输过程中还受到来自各方面的干扰和噪声，因此当到达接收设备时，信号是很微弱的，因而需要经过放大器的放大。并且，高

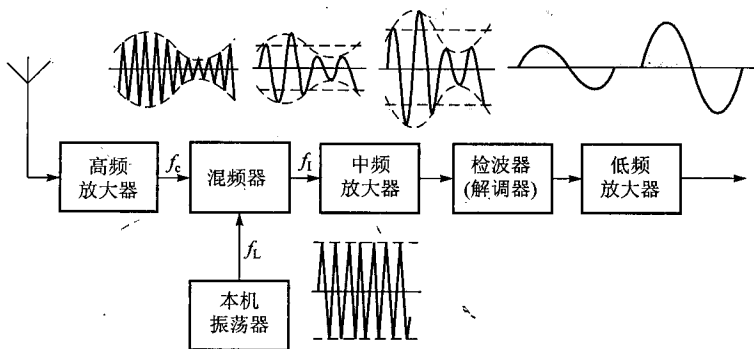


图 1-3 超外差式调幅接收机组成框图

频放大器的窄带特性同时能够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，与本地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、角度调制及其解调。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：从几十千赫兹到几十兆赫兹。习惯上按频率范围将电磁波划分为若干个区段，称为频段（或波段）。无线电波在空间传播的速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，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 单位为 Hz， λ 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。

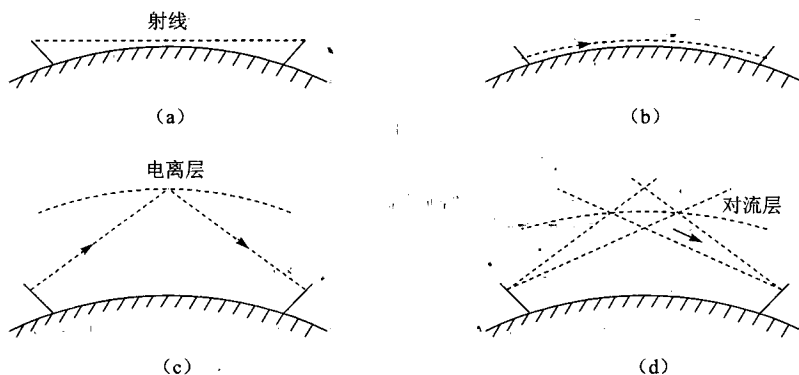


图1-4 无线电波的主要传播方式

(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台中波信号。

2. 视距传播(直射波)

特点: 收信、发信高架(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; 还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。

4. 散射传播

利用对流层折射指数随机不均匀体对入射无线电波的再辐射, 将无线电波传送到视线距离以外的一种传播方式。

特点: 可以实现超视距传输; 同时具有适中的传输容量、传输性能和可靠度, 以及特别强的抗核爆能力。在特殊地区通信、干扰协调距离计算、对流层介质遥感、远距离侦察接收和超视距雷达等方面, 仍有广泛的应用前景。

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列出按波长划分的波段名称、



相应的波长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		波长范围	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		1 000 ~ 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	分米波	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。

所谓调制，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，调制分为三种基本方式：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，还可以有组合调制方式。

1.3 本课程的特点

1. 本课程的特点

高频电子线路是低频电子线路的后续课程。从它处理的信号频率的角度来说，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而言的。通常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。

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



在本教材中, 阐述的各部分高频电子线路, 除高频小信号谐振放大器外, 其他都是非线性电路。相对于线性电子线路的分析方法来说, 非线性电子线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, 而不要仅局限于掌握某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) 重视实验环节, 坚持理论联系实际, 在实践中积累丰富的经验。

1.4 实训1: 函数信号发生实验

1. 实验目的

(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. 实验内容

(1) 高频实验箱的正确使用。

(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) 3 种波段参数的比较。

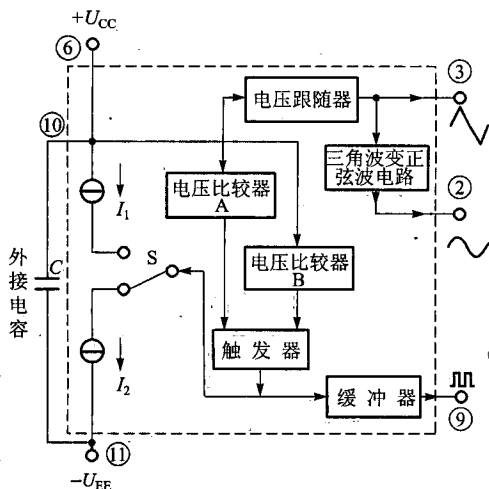


图 1-5 ICL8038 单片集成函数信号发生器内部框图

3. 实验预习要求

参阅相关资料中有关 ICL8038 的内容介绍。

4. 实验原理

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 $I_2 > I_1$ 。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 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 的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), 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一个非线性网络 (正弦波变换器) 而得以实现, 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 引脚功能排列, 如图 1-6 所示。

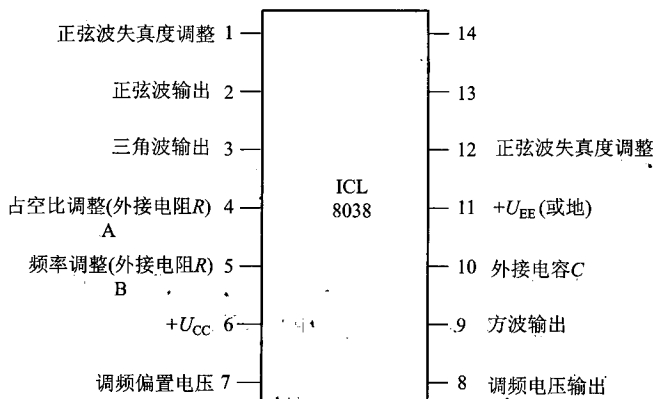


图 1-6 ICL8038 引脚排列

供电电压为单电源或双电源: 单电源 $10 \sim 30 \text{ V}$

双电源 $\pm 5 \text{ V} \sim \pm 15 \text{ V}$

② ICL8038 实验电路原理如图 1-7 所示。

图中, 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 W_1 为输出频率细调电位器, 电位器 W_2 调节方波占空比, 电位器 W_3 、 W_4 调节正弦波的非线性失真。

③ 实际线路分析。ICL8038 的实际线路与图 1-7 所示基本相同, 只是在输出端增加了一块 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, 本电路的输出频率范围为 $10 \text{ Hz} \sim 11 \text{ kHz}$; 幅度调节范围: 正弦波为 $0 \sim 12 \text{ V}$, 三角波为 $0 \sim 20 \text{ V}$, 方波为 $0 \sim 22 \text{ V}$ 。若要得到更高的频率, 可适当改变三挡电容的值。

5. 实验仪器与设备

① TKGPZ-1 型高频电子线路综合实验箱。

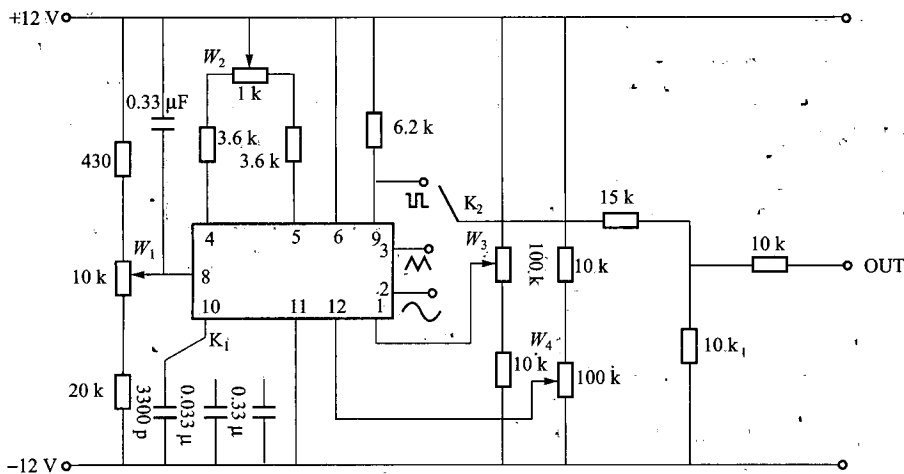


图 1-7 ICL8038 实验电路原理

② 双踪示波器。

③ 频率计。

④ 交流毫伏表。

6. 实验内容与步骤

在实验箱上找到本次实验所用的单元电路，并与电路原理图相对照，了解各个切换开关的功能与使用，然后按前述的实验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（TP₇₀₁）的波形。通过反复调节电位器 W_2 、 W_3 、 W_4 ，使输出正弦波的失真度为最小。

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 $U=f(f)$ 。

第 1 步：从最低频段开始，调节频率细调电位器 W_1 ，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）。

频率 f										
电压 U										

第 2 步：切换到中间频段，重复第 1 步。

第 3 步：切换到最高频段，重复第 1 步。

(2) 输出三角波的观察

通过调节频率和幅度，观测输出的波形。

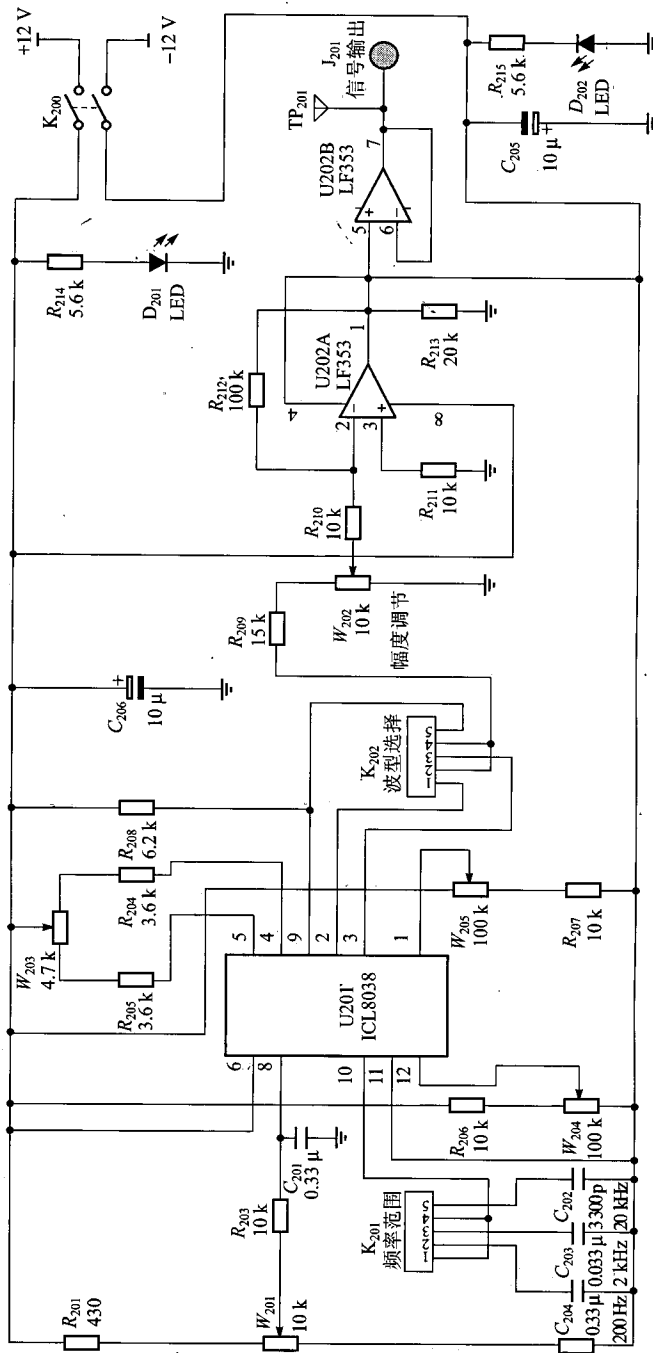


图 1-8 函数信号发生实际线路