

# 无线电技术基础

——信号与线性电路

王祥生 余任之 强世锦 编

电子科技大学出版社

# 无线电技术基础

## —信号与线性电路

王祥生 余任之 强世锦 编

电子科技大学出版社

• 1995 •

[川]新登字 016 号

### 内 容 简 介

本书由电子工业部中等专业学校电子类专业教材协会组织,按照新的部颁教学大纲要求编写的。

本书主要内容为无线电技术基本知识,谐振电路的选频特性,双口网络理论及其应用,信号及线性电路分析。

本教材力求适应中等专业学校的教学特点,每节后有思考题,每章后有小结和习题,在内容安排上适当降低深度并结合科技发展拓宽广度。同时在教材的体系上为使用者尽量提供多种选择的余地。

本书可作为中等专业学校无线电技术专业《无线电技术基础》课程教材,也可供其他电类中等职业技术教育使用,以及有关工程技术人员学习参考。

## 无线电技术基础 ——信号与线性电路

王祥生 余任之 强世锦 编

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

成都东方彩印厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 400 千字  
版次 1995 年 7 月第一版 印次 1995 年 7 月第一次印刷  
印数 1—4000 册

ISBN 7-81043-195-1/TN·22

定价: 14.20 元

## 前 言

本书由电子工业部中等专业学校电子类专业教材协会组织编写,供中等专业学校电子类专业使用。

本书按 1992 年 10 月电子工业总公司颁布的新大纲编写,总学时数为 90(打“\*”内容供参考选用,不计在 90 学时内)。书中内容按两大部分来编写,第一部分为第一章到第三章,介绍无线电技术的一些基本知识,信号的频域分析初步,线性电路的频域分析。第二部分为第四章和第五章,它构成本书对信号和线性电路高一层次的分析:对信号的分析由周期性扩伸到非周期性,由模拟扩展到离散(数字),对线性电路的分析则由频域分析扩伸到复频域和时域分析,由定性的近似不失真地通过信号到定量地求信号通过线性电路的响应,还简要介绍了数字信号及其通过线性电路的分析。上述前后两大部分各自成体系又相互衔接,构成本书对信号及线性电路分析的两个层次的循环,因而可在教学中灵活掌握选用。

本书由珠海市工业学校王祥生(第一、二章及第三章第四、五节)、武汉无线电工业学校强世锦(第三章第一、二、三节)和广东省电子技术学校余任之(第四、五章)共同编写,由王祥生、余任之担任主编,梁永汉担任主审。

本教材编写过程中得到张中洲同志大力帮助,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,加上统稿时间紧迫,书中肯定存在缺点和错误,切望广大读者批评指正。

编 者

1995 年 5 月

# 目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1-1 无线电技术的发展和应 用	(1)
思考题	(3)
§ 1-2 信号分析初步	(3)
一、信号的概念	(3)
二、信号的类型	(4)
三、周期性非正弦信号的频谱	(4)
四、频谱特性的表达方法	(7)
思考题	(9)
§ 1-3 周期性非正弦信号作用于线性电路的分析与计算	(10)
一、电路中电流和电压的分析计算方法	(10)
二、电路中功率的分析计算方法	(12)
三、非正弦周期电流和电压的有效值	(14)
思考题	(15)
§ 1-4 无线电通信的基本原理	(15)
一、调幅信号的频谱分析	(15)
二、原始信号直接发射和接收存在的问题	(17)
三、利用调制技术来传送原始信号	(18)
四、无线电波的波段划分	(19)
五、无线电通信的基本原理	(20)
思考题	(21)
§ 1-5 信号通过线性电路不失真的条件	(21)
思考题	(26)
§ 1-6 本章小结	(26)
习题	(28)
第二章 谐振电路的选频特性	(31)
§ 2-1 引言	(31)
思考题	(32)
§ 2-2 串联谐振电路	(32)
一、电路及其参数	(32)
二、阻抗曲线	(33)
三、串联谐振及其特点	(34)
四、串联谐振电路的频率特性曲线	(37)
五、串联谐振电路的选频特性指标	(40)
六、串联谐振电路参数的深入讨论	(43)

七、串联谐振电路在无线电技术中的应用	(45)
八、附录(LC 元件电压为输出时的幅频特性)	(46)
思考题	(48)
§ 2-3 并联谐振电路	(49)
一、电路及参数	(49)
二、阻抗曲线	(50)
三、并联谐振及其特点	(52)
四、并联谐振电路的频率特性曲线和选频特性指标	(54)
五、信号源内阻 $R_s$ 和负载电阻 $R_L$ 对并联谐振电路选频特性的影响	(56)
六、部分接入的并联谐振电路分析	(59)
七、附录	(67)
思考题	(71)
§ 2-4 双调谐耦合谐振电路	(72)
一、电路及参数	(72)
二、等效电路及谐振类型	(78)
三、频率特性曲线及选频特性指标	(87)
四、其他情况下的耦合电路特性简述	(93)
思考题	(95)
§ 2-5 本章小结	(95)
习题	(100)

### 第三章 双口网络的传输特性 (104)

§ 3-1 概述	(104)
思考题	(106)
§ 3-2 双口网络的传输特性	(106)
一、双口网络的基本方程和参数	(106)
二、双口网络的网络函数	(112)
三、双口网络的镜像参数	(118)
四、阻抗匹配网络	(126)
思考题	(132)
§ 3-3 镜像参数滤波器	(132)
一、 $\Gamma$ 形网络的导通条件	(133)
二、单端口纯电抗网络的电抗曲线	(134)
三、 $K$ 式滤波器	(139)
四、 $m$ 式滤波器	(142)
五、复合滤波器	(148)
六、其他类型的滤波器	(150)
思考题	(159)
§ 3-4 传输线	(159)

一、基本概念 .....	(159)
二、传输方程式 .....	(161)
三、 $Z_L = \rho$ 时传输线工作分析 .....	(164)
四、 $Z_L = 0$ 和 $Z_L = \infty$ 时传输线工作分析 .....	(167)
五、终端接任意电阻负载的传输线工作分析 .....	(173)
六、传输线的应用 .....	(177)
思考题 .....	(180)
§ 3-5 本章小结 .....	(181)
习题 .....	(184)
第四章 信号分析 .....	(187)
§ 4-1 概述 .....	(187)
§ 4-2 周期性信号 .....	(188)
一、引言 .....	(188)
二、非正弦周期信号的分解 .....	(188)
三、非正弦周期信号的频谱 .....	(190)
思考题 .....	(195)
§ 4-3 非周期性信号 .....	(195)
一、频谱函数 .....	(195)
二、傅里叶变换 .....	(196)
三、非周期信号的频谱 .....	(197)
四、傅里叶变换的性质 .....	(201)
思考题 .....	(204)
§ 4-4 调幅波信号 .....	(204)
一、调幅波信号及其频谱 .....	(204)
二、调幅波的功率关系 .....	(208)
思考题 .....	(208)
§ 4-5 调角波信号 .....	(209)
一、角度调制 .....	(209)
二、调角信号的频谱 .....	(211)
思考题 .....	(214)
§ 4-6 数字信号 .....	(214)
一、取样定理 .....	(215)
二、模拟信号的脉冲编码调制(PCM) .....	(218)
思考题 .....	(219)
§ 4-7 数字载波调制信号 .....	(219)
一、二进制幅度键控(2ASK) .....	(220)
二、二进制频移键控(2FSK) .....	(221)
三、二进制相移键控(2PSK) .....	(221)

§ 4-8 本章小结 .....	(221)
习题 .....	(224)
<b>第五章 信号通过电路 .....</b>	<b>(225)</b>
§ 5-1 引言 .....	(225)
思考题 .....	(226)
§ 5-2 频域分析法 .....	(226)
一、单一频率的正弦稳态响应 .....	(227)
二、非正弦周期信号通过线性电路 .....	(227)
三、非周期信号通过线性电路 .....	(229)
四、无失真传输条件的进一步讨论 .....	(231)
思考题 .....	(234)
§ 5-3 复频域分析法 .....	(234)
一、从傅里叶变换到拉普拉斯变换 .....	(234)
二、单边拉普拉斯变换的求法和性质 .....	(236)
三、复频域分析法——运算法 .....	(240)
思考题 .....	(248)
§ 5-4 时域分析法 .....	(248)
一、网络函数及网络的冲激响应和阶跃响应 .....	(248)
二、信号的时域分解 .....	(252)
三、时域分析法——卷积积分法 .....	(254)
思考题 .....	(258)
§ 5-5 离散时间系统分析简介 .....	(258)
一、离散时间系统的概念 .....	(259)
二、数字滤波器简介 .....	(263)
§ 5-6 本章小结 .....	(266)
习题 .....	(267)



# 第一章 绪 论

无线电技术基础是中等专业学校无线电技术专业的一门主要专业基础课,是本专业教学计划中首先大量接触到专业的一门课程。学习本课时,一开始就会涉及到许多有关专业的入门知识,这些入门知识是理解本课主体内容的极其重要的基础知识。这些基础知识对于从事本专业的人员似乎是很易明白,可以一带而过的常识,但对刚接触到本课程的初学者却是不容易理解和掌握的,需要一个循序渐进的学习过程。本教材把绪论列为一章,占用了较长篇幅就是为达到上述目的,并在此基础上对本课程的内容、特点和要求作一概括介绍。

## § 1-1 无线电技术的发展和應用

什么是无线电技术呢?通常把无线电通信称之为无线电,无线电技术就是在无线电通信的发展过程中形成的一门工程技术。无线电通信又是怎样进行的?这要首先从有线电通信谈起。有线电通信的典型例子就是有线电电话,图 1-1-1 表示一个有线电电话系统示意图。

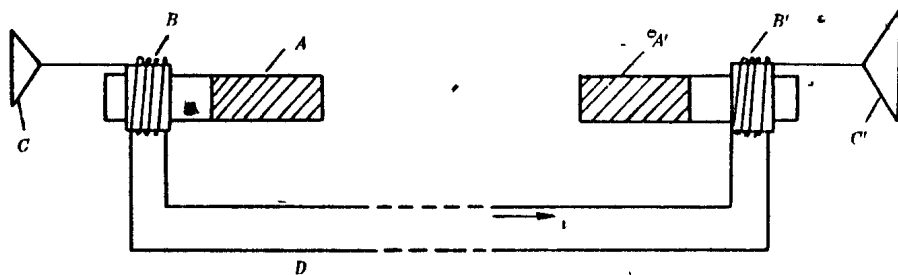


图 1-1-1 有线通信示意图

图 1-1-1 中,  $A(A')$  表示位置固定的永久磁铁,  $B(B')$  表示可以在永久磁铁上作纵向运行的线圈,  $C(C')$  表示与线圈连成一体的喇叭形纸盆。当对准纸盆  $C$  讲话时, 声波使纸盆  $C$  作纵向振动, 纸盆  $C$  又带动线圈  $B$  作切割永久磁铁  $A$  磁力线的纵向运动, 于是在线圈  $B$  中产生了感应电动势, 这个感应电动势在传输线  $D$ 、 $B$ 、 $B'$  形成的回路中产生感应电流  $i$ 。显然, 电流  $i$  的变化反映了声波的变化规律, 也就是声信号变成了电信号, 我们把起到上述作用的  $ABC$  系统称为声电换能器。信号电流  $i$  通过传输线  $D$  流入线圈  $B'$  时, 作为处于永久磁铁  $A'$  磁场中的载流导体, 线圈  $B'$  必然要作纵向运行, 从而带动纸盆  $C'$  使之振动而发出声波。显然,  $A'B'C'$  系统是一个把电信号转变成声信号的换能器。实际上  $ABC$  系统和  $A'B'C'$  系统的作用是相互可逆的, 对准纸盆  $C'$  讲话, 同样也可以由纸盆  $C$  发出声音。如果传输线比较长, 那么上述声信号  $\rightarrow$  电信号  $\rightarrow$  沿传输线传送  $\rightarrow$  电信号  $\rightarrow$  声信号的过程就完成了把声信号进行长距离传送的目的, 由于必须利用传输线来传送, 所以称为有线电电话。当然, 实际上的电声换能器构造和有线电通信系统的组成要比示意图复杂得多, 初期的设备也不是示意图中的

形式。但是,示意图表示了有线电通话系统的最基本构成方式,即必须要有三部分组成:能把声信号转变为电信号的换能器,称之为话筒;能把电信号转变为声信号的换能器,称之为扬声器或喇叭;能传送电信号的导线,称之为传输线。在上述示意图中,话筒与扬声器是可逆的,但实际应用中则各有特点,不宜可逆运用,有的则完全不可逆,如炭精式话筒。

由于有线电通话离不开传输线,这对长距离通话带来不方便,人们开始寻找无需传输线的远距离通话方式,即无线电通话。图 1-1-2 表示一个无线电通话系统(实际上只能由发方讲话,收方来收听,称为无线电广播更适合一些)。

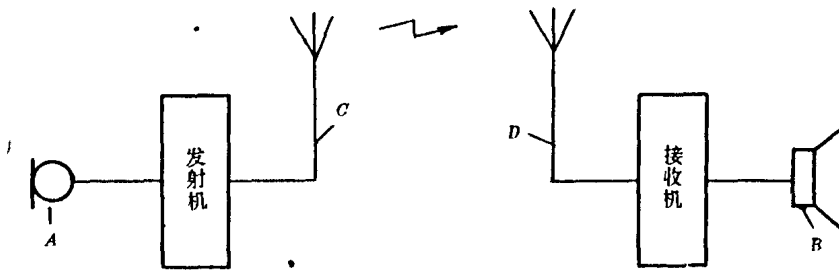


图 1-1-2 无线电通信(广播)示意图

A 为话筒,B 为扬声器,C 为发射天线,D 为接收天线。声音经话筒变为电信号,通常称之为原始信号,发射机把原始信号转换为大功率的高频受调电信号,发射天线的作用是把含有原始信号的高频受调电信号转变为可在空间传播的电磁波,以光速传播的电磁波(简称为电波)到达接收天线所在地后,接收天线的作用是把电波转变为高频受调电信号送给接收机,接收机对高频受调电信号加工处理,还原出原始电信号,再送给扬声器发出声音,实现了不用传输线而依靠电波在空间传播来进行的远距离通话,即无线电通话。

上述通信系统中,要传送的信号是声音(语言、音乐等),所以就具体地称为无线电通话或无线电广播。如果信号是固定的图像,就称为无线电传真;信号是活动的图像就称为无线电视,简称为电视;信号是由点、划、空以一定组合而形成的电码时,就称为无线电电报。以上统称为无线电通信。当然,信号形式不同时,换能器的职能也就不同,但共同的一点就是都要转换成电信号来进行传送。

十九世纪初,人们开始研究有线电通信,1837 年莫尔斯发明了电码(称为莫尔斯电码),有线电报首先应用,1876 年贝尔发明有线电话。此后,科学家进行无线电通信的研究,在 1865 年麦克斯韦提出电磁波学说的理论和赫芝于 1887 年通过实验证实电磁波学说的基础上,1895 年马可尼和波波夫分别发明了利用电磁波在空间的传播代替传输线传送信号的无线电通信方式,无线电技术诞生了。

无线电技术是在无线电通信的发展过程中形成的一门工程技术。所以,今天的无线电技术已不仅只限于应用在通信方面。当然,在其发展初期,从 1895 年发明无线电到本世纪 30 年代中期之间,无线电技术的应用主要在无线电通信方面。此后,这门应用性极强的工程技术触类旁通,其应用范围已远远超出通信职能的范畴。

例如,40 年代初期出现了无线电定位技术,又称为雷达。它利用发射出的电波从被测体反射回来又被接收的方法,可以测出被测体的空间位置和特征。这里,雷达和被测体之间,是

雷达发射和接收的电波传送了被测体空间位置的信息,雷达技术最早应用于军事,现已广泛用于民用的各个方面,它还带动了无线电天文学和无线电气象学的发展。

火箭、导弹、人造卫星和宇宙飞船的相继问世,使无线电技术应用到对远处机体进行控制、测量的无线电遥控、无线电遥测的技术领域。这方面的技术又应用到工业生产自动化、运输、医疗、钻探和科学研究的许多方面。建立在无线电通信设备的生产、调试和检验所需的基础上而发展起来的无线电测量技术(含仪器)已广泛应用到各个方面。

电子计算机是无线电电子学发展一大成就,它解决了庞大数据的计算困难和数学难题的近似求解,可以接收、发送、存储任何各类的数据信息,包括语言、图像、音乐、文件等,它既可以协助我们进行工程设计、资料查寻、事物管理、通信联络、数据处理等,又可以提供各式各样的视听娱乐。

近代无线电技术已是一个包括许多应用分支、内容十分丰富的学科。它是在无线电通信基础上发展起来的,它的发展和拓宽反过来又推动了近代无线电通信技术的发展,比如电子计算机技术应用到通信设备中使通信设备性能大大提高,由此产生一门新技术——计算机通信。

无线电技术的发展是与电子器件的发展紧密结合的。1904年弗莱明发明电子管到1947年贝尔研究所发明晶体管的四十多年时间内,电子器件主要是电子管,这是一种体积大、耗能多的电子器件。此后,晶体管这一耗能低体积小的半导体器件不断发展,逐渐代替电子管,无线电设备不断向小型化、低功耗、高功能的方向发展。1958年出现电子器件密集化的集成电路,1967年出现大规模集成电路和1978年研制出的超大规模集成电路更促使了无线电技术的飞跃发展,此后,集成电路的密集规模的每一次提高都带来无线电设备的一次更新换代。因为无线电技术的发展过程同时也是不断研制新的电子器件的电子学发展过程,常常把无线电和电子学合起来称为无线电电子学,把无线电技术进而称为电子技术。

## 思 考 题

1. 有线电通信系统最低限度应有哪几部分组成?
2. 无线电通信的“无线”指什么? 无线电通信系统中天线上的电信号与有线电通信系统中传输线上的电信号有何不同? 无线电通信与有线电通信的区别有哪些?
3. 按信号形式的不同,无线电通信又分哪些类型?
4. 列举一下你所知道的无线电技术的应用范围。
5. 无线电技术的发展为什么说与电子器件的发展紧密相联? 电子器件的发展到目前为止经历了哪些阶段?
6. 如何评价换能器在有线或无线电通信中的作用?

## § 1-2 信号分析初步

### 一、信号的概念

通常把代替一定意义的,以光、声、电等不同物理量形式表现的语音、文字、图像、数据、

温度、湿度等统称为消息。为了用前述的有线或无线的形式传送这些消息,就用换能器把它们转换为电信号,以后简称为信号。因此,信号是运载消息的工具,它的基本形式是随时间变化的电流或电压。

## 二、信号的类型

信号的形式是多种多样的,按不同标准来划分,有不同的类型:按随时间的变化特点来分类,信号可分为连续信号和离散信号两大类。

连续信号是指在连续时间范围内所定义的信号,如图 1-2-1 所示。电话或广播的语言信号,电视的图像信号等都是连续信号。

离散信号是指在一些离散的瞬间才有定义的信号,如图 1-2-2 所示,信号仅在  $t=0, 1, 2, \dots$  才有确定的幅值,而在其他时间,信号  $f(t)$  没有定义。电子计算机中的数字信号就是离散信号。

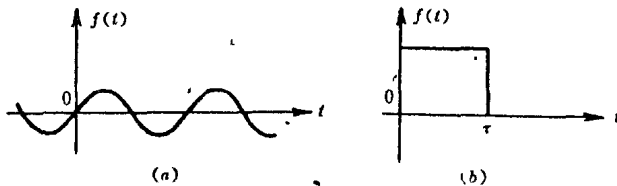


图 1-2-1 连续信号

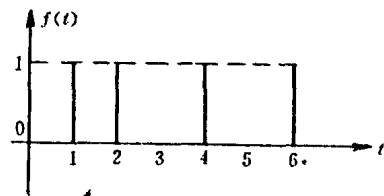


图 1-2-2 离散信号

按可知性来分类,信号又可分为确知信号和随机信号两大类。确知信号(也可叫规则信号)的电压或电流可以表示为一个确定的时间函数,当给定某一时间值时,函数有确定的数值。确知信号按函数值的重复性来分,又可分为周期性信号和非周期性信号。周期性信号按函数变化特性的不同又可分为正弦信号和非正弦信号两大类。实际上,由于种种原因,在信号传输的过程中存在着某些不确定性或事先不可预知性。譬如,在通信系统中,收信者在收到所传送的消息之前,对信息源所发出的消息总是不可能完全知道的,否则通信就没有意义了。此外,携带消息的信号在传输的各个环节中不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响,而这些干扰和噪声的特性总是不可能完全确知的。这类不确定性和事先不可预知性统称为随机性,所以严格说来,一般的信号都是随机信号或称不规则信号。研究随机信号要用统计的观点和方法。虽然如此,研究确知信号仍是十分重要的,这是因为它是一种理论上的科学抽象,同时也是研究随机信号问题的重要基础。

按无线电通信过程中对信号的处理方式又可把信号分为原始信号和受调信号两种。前述把各种消息经换能器输出的电信号称为原始信号,或简称为原信号。受调信号则是一种比原始信号频率高得多的高频信号,这些高频信号的某个参数(频率,幅度或相位)随原始信号的变化规律而变化,所以能传送原始信号的信息,这种受调信号便于发射,又称射频信号。

## 三、周期性非正弦信号的频谱

前已述,研究确知信号是研究信号的基础,而非周期性信号又可以看成是周期性信号在周期  $T$  趋于无限大的一个特例。周期性正弦信号是在电工课中很熟悉的交流电信号。因此,

对信号的分析了解自然就首先侧重于对周期性非正弦信号的分析了。

求一个复杂信号在电路中的传输情况常常是困难的。一个简单信号,比如正弦信号在电路中的传输就简单得多。把一个复杂信号分解为众多简单信号之和,这项工作称为信号分析。当简单信号是一些不同频率(幅度和初相可能也不同)的正弦信号时,这种对信号的分析就称为信号的频域分析。组成复杂信号的这些众多不同频率正弦信号的总和称为复杂信号的频谱,所以信号的频域分析即为求信号的频谱。

周期性非正弦信号的频谱可以借助于高等数学中求傅里叶级数的方法来解决。设周期性非正弦信号  $f(t)$  的周期为  $T$ , 相对应的频率为  $F$ , 角频率为  $\Omega$ , 有  $\Omega = 2\pi F = 2\pi/T$ 。  $f(t)$  的傅里叶级数表达式为:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t - \phi_n) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-2-1)$$

其中 
$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

$a_0, a_n, b_n$  称为傅里叶系数,可由欧拉-傅里叶积分公式求出,有关内容可查阅高等数学课本。这里要强调的是对傅里叶级数展开式(1-2-1),也即是周期性非正弦信号的频谱表达式的理解和应用。

表 1-2-1 中列出了一些常见的周期性非正弦信号及其傅里叶级数展开式。下面,以方波为例,进一步理解其含义。

表 1-2-1 中方波的周期为  $T$ , 幅度为 1, 频谱表达式为:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} (\sin\Omega t + \frac{1}{3}\sin 3\Omega t + \frac{1}{5}\sin 5\Omega t + \dots + \frac{1}{n}\sin n\Omega t + \dots) \quad (1-2-2)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

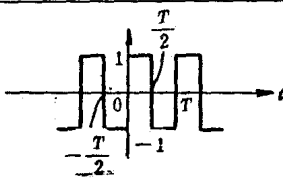
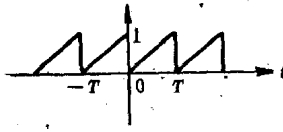
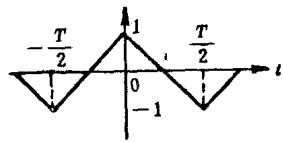
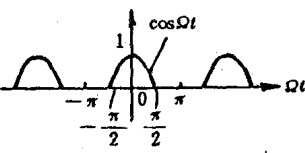
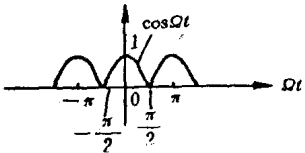
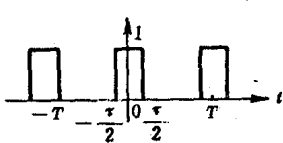
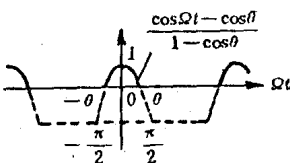
式中  $a_0$  项为零,即表示频谱中直流成分为零,  $n=1$  的正弦成分为  $\frac{4}{\pi}\sin\Omega t$ , 该正弦成分的频率与方波信号频率相等,称之为基波分量。 $n=3$  的正弦成分为  $\frac{4}{3\pi}\sin 3\Omega t$ , 频率是基波分量的三倍,称之为三次谐波分量。 $n=5$  的正弦成分则为五次谐波分量……。 $n=2, 4, 6, \dots$  的正弦分量不存在,即该方波的频谱中只有奇次谐波而无偶次谐波。图 1-2-3 直观地表示了各次谐波组合成方波的情况,图 1-2-3(a)中细线为方波,粗线为基波分量,它们的周期是相同的,但波形相差较大。图 1-2-3(b)中,粗线为基波和三次谐波的合成,与方波相比,接近了一些。图 1-2-3(c)的粗线为基波、三次谐波和五次谐波的合成波形,更接近方波了。按图 1-2-3(d)的发展趋势下去,考虑的谐波成分愈多,次数愈高则波形的细节部分就愈接近于方波。如果把所有高次谐波都考虑进去,那么其合成波形就完全是方波了。

从方波的例子,可以得出波形与其谐波间关系的一般性结论:

- (1)任何周期性非正弦信号,都能用正弦信号合成,合成的谐波项数愈多准确度愈高。
- (2)合成信号的周期是以基波分量的周期为周期的。

(3)振幅较大的低次谐波组成非正弦信号的主体,而振幅较小的高次谐波则影响着周期性非正弦信号的细节部分。

表 1-2-1 常用信号的傅里叶级数(或系数)

名称	波形	傅里叶级数(或系数)( $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ )
方波		$f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t + \frac{1}{5} \sin 5\Omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\Omega t + \dots \right)$ $n = 1, 3, 5, \dots$
锯齿波		$f(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \left( \sin \Omega t + \frac{1}{2} \sin 2\Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\Omega t + \dots \right)$ $n = 1, 2, 3, 4, \dots$
三角波		$f(t) = \frac{8}{\pi^2} \left( \cos \Omega t + \frac{1}{9} \cos 3\Omega t + \frac{1}{25} \cos 5\Omega t + \dots + \frac{1}{n^2} \cos n\Omega t + \dots \right)$ $n = 1, 3, 5, \dots$
半波整流		$f(t) = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \Omega t + \frac{1}{3} \cos 2\Omega t - \frac{1}{15} \cos 4\Omega t + \dots - \frac{\cos \frac{n\pi}{2}}{n^2 - 1} \cos n\Omega t + \dots \right)$ $n = 2, 4, 6, \dots$
全波整流		$f(t) = \frac{4}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\Omega t - \frac{1}{15} \cos 4\Omega t + \dots - \frac{\cos \frac{n\pi}{2}}{n^2 - 1} \cos n\Omega t + \dots \right)$ $n = 2, 4, 6, \dots$
矩形脉冲		$\frac{A_0}{2} = \frac{\tau}{T}$ $A_n = a_n = \frac{2}{\pi} \frac{\sin \frac{n\Omega \tau}{2}}{n}$ $b_n = 0 \quad n = 1, 2, 3, \dots$
余弦脉冲		$\frac{A_0}{2} = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}$ $A_1 = a_1 = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}$ $b_n = 0 \quad n = 1, 2, 3, \dots$ $A_n = a_n = \frac{2[\pi \sin \theta \cos n\theta - \cos \theta \sin n\theta]}{\pi n(1 - n^2)(1 - \cos \theta)} \quad n = 2, 3, 4, \dots$

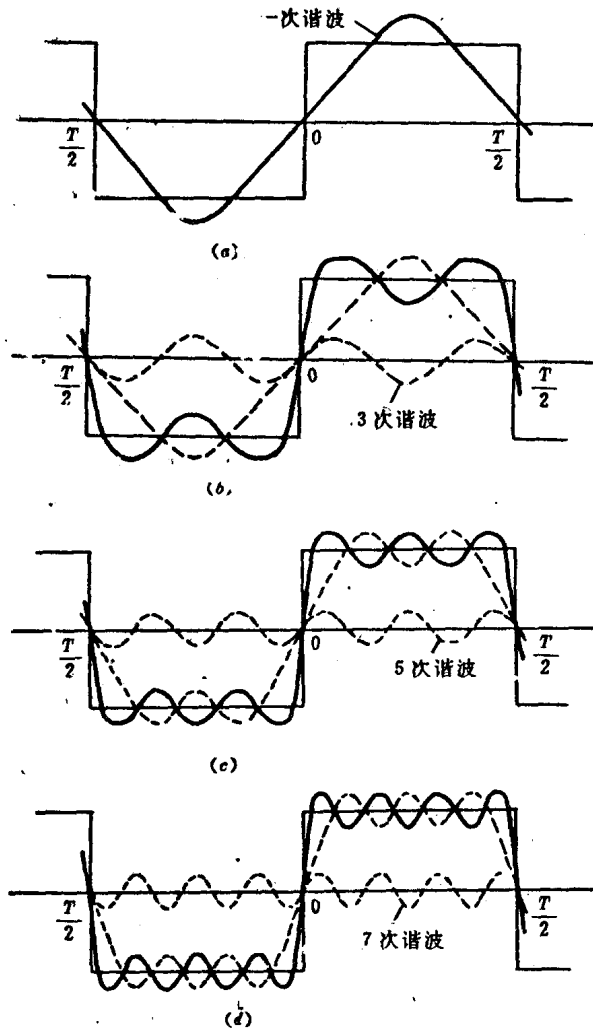


图1-2-3 方波信号的合成过程

现在总结一下信号的频谱特性。由表1-2-1可知,不同波形的周期性非正弦信号的频谱特点是不同的,但是它们有一些共同的特性,就是频谱中的各谐波成分都相隔 $\Omega$ 的角频率,即谐波的角频率是不连续的,称此特点为离散性。其二就是任何谐波的角频率都是 $\Omega$ 的整数倍,称此特点为谐波性。其三就是随着谐波次数的增加,即谐波频率的升高幅值呈下降趋势,此特点称为收敛性。离散性、谐波性、收敛性是所有周期性非正弦信号频谱的共同特点。

#### 四、频谱特性的表达方法

周期性非正弦信号的频谱特性数学上可以由傅里叶级数表达式来表征,更直观的表达方法就是用频谱图表示。频谱图分两种,一种是幅频图,一种是相频图,两个图合在一起才能表示完整的频谱特性。

于直角坐标中,以角频率为横轴,以振幅值为纵轴,将每一个正弦分量按上述要求找到

的点引一条垂直于横轴的垂线,这种每一条线代表一个正弦分量,有多少条线则代表有多少个正弦分量的图称为幅频图。

于直角坐标中,以角频率为横轴,以初相为纵轴,同样地一条垂线代表一个正弦分量的图称为相频图。

显然,幅频图上只表示出各个分量的幅值和频率,其相位无从表达。相频图上只表示各个分量的初相和频率,其幅值无法表达。所以,两个图合在一起才能表达各个分量的完整特点,即其频率,振幅,初相。

在各正弦分量的上述三要素中,频率和振幅两个要素是更经常关注的,所以幅频图比相频图更经常用到,常常狭义地把幅频图就称为频谱图。在上述频率和振幅两个要素中,又更为关注频率这个要素,就用信号的频谱频率范围和频带宽度两个数字量来简述频谱特性。

信号的频谱频率范围就是指频谱中最低的频率值  $F_{\min}$  到最高的频率值  $F_{\max}$ 。这里,应说明一下  $F_{\max}$  的确定方法,从表 1-2-1 所举各种信号的傅里叶级数展开式可知,其高次谐波的频率一直可以延续到无穷大,这样  $F_{\max}$  就是无穷大了。实际上无需如此考虑,由于频谱特性的收敛性,频率愈高其振幅愈小,常常定一个标准(比如谐波振幅下降到最大振幅的十分之一),把幅度在标准以下的高次谐波忽略不计,那么,此标准线上的频率值就是  $F_{\max}$ 。信号的频带宽度简称为频宽或带宽,其大小以  $F_{\max} - F_{\min}$  的差值来表示。

【例 1-2-1】某信号的频谱表达式为:

$$\begin{aligned} i(t) = & 5 + 10\sin 10^3 t + 8\sin(2 \times 10^3 t + \frac{\pi}{4}) + 6\sin(3 \times 10^3 t + \frac{\pi}{3}) \\ & + 4\sin(4 \times 10^3 t - \frac{\pi}{3}) + 2\sin(5 \times 10^3 t - \frac{\pi}{4}) \\ & + 0.5\sin 6 \times 10^3 t + 0.1\sin(7 \times 10^3 t + \frac{\pi}{2}) \text{ mA} \end{aligned}$$

画出该信号的幅频图,相频图,以 1/10 为标准求出其频率范围和频带宽度。

解:  $i(t)$  中直流成分为  $I_0 = 5\text{mA}$ , 直流可以看成是周期无限大,即频率为零的正弦分量,或称为零频分量,零次谐波,所以直流成分在频谱图上是一条与纵轴重合的竖线,各正弦分量的频率(或角频率)、振幅、初相关系及对应的幅频图、相频图见图 1-2-4。

谐波振幅最大值为 10mA,以 1/10 为标准,则振幅在 1mA 以下的谐波忽略不计,可得:

$$\omega_{\min} = 0, \quad \omega_{\max} = 5 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

或者  $F_{\min} = 0, F_{\max} = \frac{25}{\pi} \times 10^2 \text{ Hz}$ , 信号的频谱频率范围为  $0 \sim \frac{25}{\pi} \times 10^2 \text{ Hz}$ , 信号的频带宽度为  $\frac{25}{\pi} \times 10^2 \text{ Hz}$ 。

【例 1-2-2】某信号的频谱成分中,最低频率为 100Hz,忽略振幅太小的高频分量后,最高频率分量的频率为 10kHz,求该信号的频宽。

解:由题意可知  $F_{\min} = 100\text{Hz}, F_{\max} = 10\text{kHz}$ , 则

$$\text{频宽} = F_{\max} - F_{\min} = 10 \times 10^3 - 100 = 9900\text{Hz} = 9.9\text{kHz}$$

【例 1-2-3】已知某信号的幅频图如图 1-2-5 所示,试求该信号的频宽。

解:由图可知

$$\omega_{\min} = 5 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad \omega_{\max} = 7 \times 10^3 \text{ rad/s}$$



$$F_{\min} = \frac{1}{2\pi} \omega_{\min} = 0.796 \times 10^3 \text{ Hz} \quad F_{\max} = \frac{1}{2\pi} \omega_{\max} = 1.115 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$\text{频宽} = F_{\max} - F_{\min} = 0.319 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$\omega$	$I_n$	$\phi$
0	5	/
$10^3$	10	0
$2 \times 10^3$	8	$\frac{\pi}{4}$
$3 \times 10^3$	6	$\frac{\pi}{3}$
$4 \times 10^3$	4	$-\frac{\pi}{3}$
$5 \times 10^3$	2	$-\frac{\pi}{4}$
$6 \times 10^3$	0.5	0
$7 \times 10^3$	0.1	$\frac{\pi}{2}$

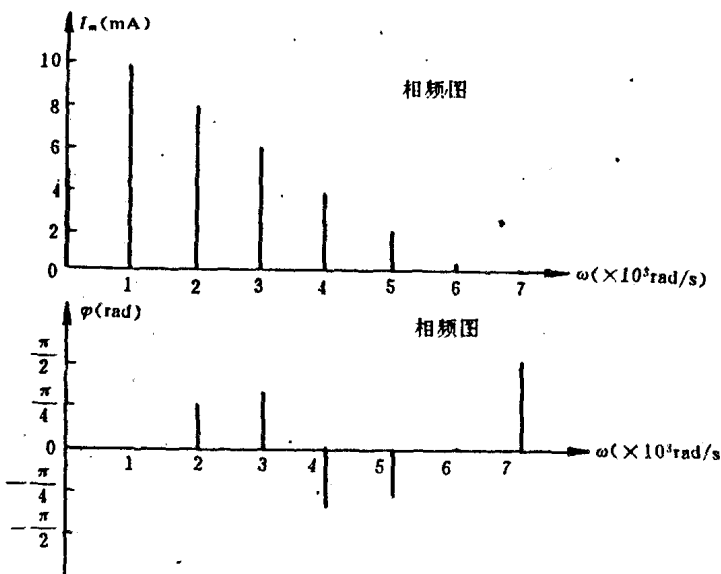


图1-2-4 例1-2-1图表

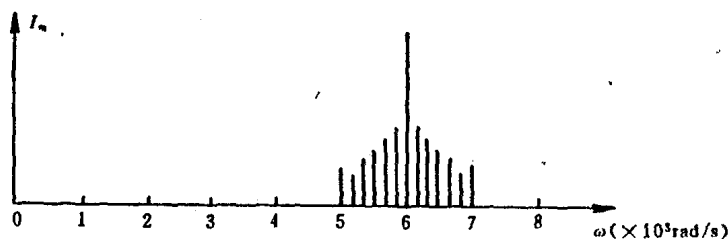


图1-2-5 例1-2-3图

### 思考题

1. 什么是电信号?它分哪些类型?各有什么特点?
2. 为什么说研究确知信号中的周期性非正弦信号有很重要的实际意义?
3. 什么叫信号分析?什么叫信号的频域分析?
4. 信号的频谱指什么?频谱特点有哪些表达方法?这些表达方法各有什么特色和不足?
5. 什么叫基波,二次谐波,三波谐波,奇次谐波,偶次谐波?
6. 为什么直流可以看成为零频(零次)谐波?
7. 周期性非正弦信号的频谱有哪些共同特点?
8. 一个周期性非正弦信号的波形与其谐波之间的关系有什么一般规律?一个确知信号的波形与确定该信号频宽大小的标准之间有什么因果关系?