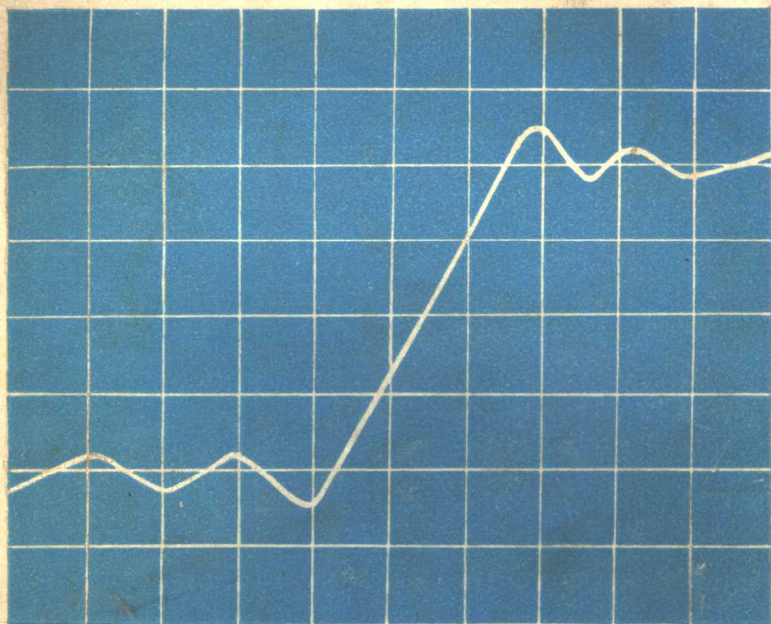


高等学校试用教材



# 信号与线性网络分析

上册

西北电讯工程学院 吴大正主编

人民教育出版社

高等学校试用教材

# 信号与线性网络分析

上册

西北电讯工程学院 吴大正主编

人民教育出版社

## 内 容 提 要

本书根据1977年12月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议拟定的《信号与线性网络分析》大纲写成。

全书共分九章：即绪论、谐振电路、双口网络、传输线、时域分析、频域分析、复频域分析、状态变量分析和离散系统分析。分上、下两册出版，上册包括前四章，是网络分析；下册为后五章，是信号与系统分析。

本书承合肥工业大学芮坤生教授主审，经1979年10月安徽九华山审稿会议通过，作为李瀚荪编《电路分析基础》的后续试用教材，供高等工业学校无线电技术专业使用，也可供有关科技人员参考。

本书责任编辑 王忠民

高等学校试用教材

## 信号与线性网络分析

上 册

西北电讯工程学院 吴大正主编

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民邮电出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.5 字数 200,000

1980年6月第1版 1980年11月第1次印刷

印数 00,001—18,000

书号 15012·0256 定价 0.86 元

## 前 言

本书是根据1977年12月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上拟定的《信号与线性网络分析》教材编写大纲编写的。

全书包括绪论、谐振电路、双口网络、传输线、时域分析、频域分析、复频域分析、状态变量分析和离散系统分析等九章。供学完《电路分析基础》课程后讲授，学时按100~110左右课堂教学时数考虑。

对谐振电路、双口网络、传输线等章的内容，保留了基本知识和基本理论，删减了一些次要内容。为了适应电子科学技术发展的需要，充实了时域、频域、复频域分析等三章的内容，介绍了状态变量分析和离散系统分析的基本理论和分析方法。

本书与李瀚荪同志编的《电路分析基础》一书相衔接，对有些内容(如动态元件、初始值、一阶网络分析等)，为了便于本书后续章节引用，进行了必要的复习。为便于自学，对有些数学内容推导和讨论较为详细，并补充了特征矩阵和矩阵函数一节，这对于求解状态方程是必须的。

有的高等学校在对本课程内容的安排上，已把传输线和已调信号的频谱等内容划归其它课程讲授；有的内容虽较为陈旧(如影象参数及滤波器等)，但目前应用尚广，根据许多同志的意见，这里仍编写了适当篇幅，以照顾尚有需要的学校。希望在选用本教材时，可以根据实际情况确定教材内容的取舍，不要受本教材的约束。

本书由吴大正同志主编，史耀琮、燕庆明、陈生潭等同志参加了本书的编写工作。

本教材经合肥工业大学芮坤生教授主审，并于1979年10月在安徽九华山召开的审稿会议进行了集体审阅。参加审稿会的学校有：北京工业学院、清华大学、北方交通大学、北京邮电学院、北京工业大学、上海交通大学、上海科技大学、天津大学、南京工学院、西安交通大学、华南工学院、重庆大学、中国科学技术大学、合肥工业大学、西北电讯工程学院等校的代表。参加审稿的同志对本书提供了许多宝贵意见。许多兄弟学校还寄来了书面意见。这些意见对于本书的编写都有很大帮助，在此我们谨向上述兄弟学校致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，定有不少错误和不妥之处，热切地欢迎读者赐教。

编者

1980年元月于西安

# 目 录

第一章 绪论	1	§ 2.4 双调谐回路	67
§ 1.1 电子学概况	1	一 互感耦合与电容耦合谐振回路的对偶性	67
一 历史的回顾	1	二 初级等效回路	69
二 电子学的应用	3	三 次级等效回路	71
§ 1.2 信号和系统	5	四 耦合电路的谐振	72
一 信号	5	§ 2.5 双调谐回路的频率特性	81
二 网络与系统	7	一 耦合系数	81
三 系统的分类	7	二 双调谐回路的频率特性	83
§ 1.3 频域分析的初步概念	12	三 双调谐回路的通频带	90
一 信号的频谱	12	习题	95
二 网络的频率响应	15	第三章 双口网络	101
§ 1.4 线性系统分析概述	21	§ 3.1 概述	101
一 系统的描述	21	§ 3.2 双口网络的方程和参数	103
二 系统分析方法	24	一 <u>Z</u> 参数	103
第二章 谐振电路	29	二 <u>Y</u> 参数	107
§ 2.1 串联谐振电路	29	三 <u>A</u> 参数和 <u>B</u> 参数	109
一 串联谐振	30	四 <u>H</u> 参数和 <u>G</u> 参数	113
二 品质因数	33	§ 3.3 双口网络的联接	118
三 谐振时回路中的能量关系	34	一 串联	119
四 频率特性	36	二 并联	120
五 通频带	41	三 串并联和并串联	121
§ 2.2 简单并联谐振电路	42	四 级联	122
一 并联谐振	43	五 双口网络联接的有效性	123
二 代换电路	47	§ 3.4 正弦稳态的网络函数	125
三 频率特性	51	一 输入阻抗和输出阻抗	125
四 串联与并联谐振电路的特点	54	二 传输函数	129
§ 2.3 复杂并联谐振电路	56		
一 并联谐振	56		
二 变换系数	61		
三 等效电路	63		

§ 3.5 线性可逆双口网络的等效	138
一 等效为T形网络	139
二 等效为π形网络	141
三 T-Π变换(Y-Δ变换)	142
四 等效为X形网络	145
§ 3.6 不可逆双口网络的等效	146
一 Z参数等效电路	146
二 Y参数等效电路	148
三 理想受控源	150
四 理想变量器和回转器	151
§ 3.7 影象参数	155
一 特性阻抗(影象阻抗)	155
二 传输常数	157
三 匹配级联网络	162
四 插入衰减和工作衰减	163
§ 3.8 阻抗匹配网络和衰减器	170
一 阻抗匹配网络	170
二 衰减器	173
§ 3.9 滤波器	178
一 Γ形网络的传通条件	180
二 K式滤波器	180
三 m式滤波器的导出	187
四 m式滤波器的特性	190
五 延时线	196
六 工作特性滤波器简介	198
习题	199

## 第四章 传输线 204

§ 4.1 引言 204

§ 4.2 均匀线的微分方程

及其稳态解 206

一 均匀线的微分方程 206

二 均匀线方程的稳态解 208

三 已知始端电压、电流的解 209

四 已知终端电压、电流的解 210

§ 4.3 传输线上的波和传播

特性 212

一 行波 212

二 特性阻抗 215

三 传播常数 216

§ 4.4 终端接有负载的

传输线 220

一 反射系数 221

二 等效阻抗 222

三 终端匹配的传输线 223

四 终端不匹配的传输线 227

§ 4.5 无耗线(全反射状态) 230

一 概述 230

二 终端短路线 233

三 终端开路线 239

四 终端为纯电抗负载的线 241

五 短路线和开路线的应用

举例 244

§ 4.6 终端接任意负载的

无耗线 247

一 沿线电压、电流分布 247

二 驻波比和行波系数 250

三 等效阻抗 251

四 传输功率 252

习题 259

参考书目 261

习题答案 262

# 第一章 绪 论

## § 1.1 电子学概况

### 一 历史的回顾

电子学是十九世纪末从物理学中派生出来的一门技术科学,它发展迅速,应用广泛,特别是近二、三十年来,已渗透到工农业生产、经济管理、国防建设、科学技术以至人们日常生活的各个方面。

1865年英国的麦克斯韦(Maxwell)总结了前人的科学技术成果,提出了电磁波的学说,并于1873年发表了关于电磁波方面的著名论文。1887年德国赫兹(Hertz)通过实验证实了麦克斯韦的学说,为电子科学奠定了基础。1895年意大利的马可尼(Marconi)、俄国的波波夫(Popov)发明了无线电,实现了无线电通信,迈出了电子学应用的第一步。在最初的一、二十年中,一直是用火花式收发报机进行无线电通讯,其所用的频率低于100千赫。

1904年英国的弗列明(Fleming)发明了真空二极管,1906年美国德福雷斯特(DeForest)制成了真空三极管,它推动了电子科学技术的蓬勃发展。1920年世界上第一座广播电台(美国)开始工作后,短波、超短波通信,电视,雷达,导航以及电子计算机等相继出现,所使用的频率也逐步扩展到短波、米波以至微波(参看图1.1-1)。

1948年美国贝尔研究所的肖克利(Shockley)、巴丁(Bardeen)和布拉顿(Brattain)发明了可以起放大作用的点接触晶体管,1958年美国制成了第一块集成电路。起初的集成电路,在面积约为一平方毫米的硅片上只能做成一个门电路,到1970年就已达到一千



个,而1976年已跃升到三万三千个。大规模集成电路的出现,加快了电子计算机的发展,目前比火柴盒还小的微型计算机的功能甚至超过了过去一台占地几百平方米的电子管计算机,它不仅促进了电子科学技术的迅猛发展,而且正把计算机的“智能”作用带进社会实践的各个方面。

50年代以后,电子科学技术所用的电磁波频率已扩展到毫米波和亚毫米波(波长小于1毫米)。1960年美国梅曼(Maiman)研制成红宝石激光器后,各种激光器相继出现,这为电子学开辟了一个新天地。虽然,人们早就知道无线电波和光波都是电磁波,可是很长时间两者之间的一段空白未被发现和利用,现在无线电波与光波已经会师了。图1.1-1中画出了电磁波谱。图中各波段的划分是相对的,因为各波段之间并没有显著的界线,事实上还有别种划分方法,不再赘述。

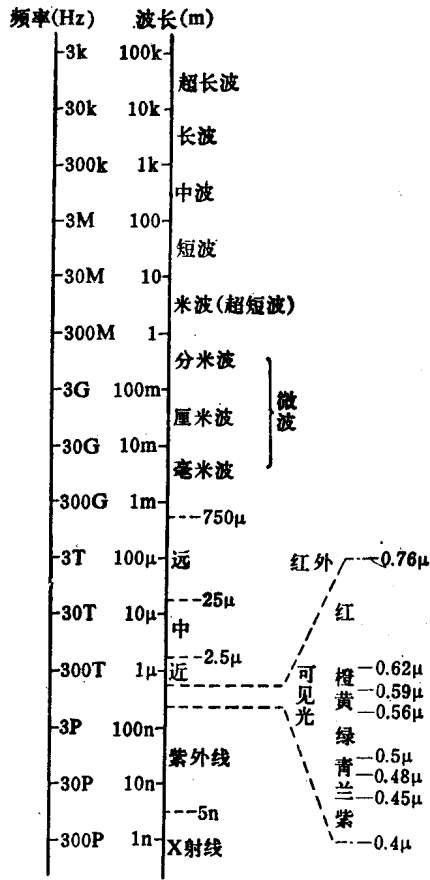


图 1.1-1 电磁波谱图中为国际制词冠

P(拍)	$10^{15}$	k(千)	$10^3$
T(太)	$10^{12}$	m(毫)	$10^{-3}$
G(吉)	$10^9$	μ(微)	$10^{-6}$
M(兆)	$10^6$	n(纳)	$10^{-9}$

目前,从米波到毫米波已实现了波段全覆盖,亚毫米波的理论与技术已日趋成熟,红外与可见激光已大量应用,紫外、X射线和 $\gamma$ 射线激光新波段的研究也取得了一定的进展。此外,对超长波在地表、地下岩层中以及在海水中的传播问题的研究,也已取得了可观的成果。

## 二 电子学的应用

电子科学技术发展十分迅速,应用非常广泛,它最早应用于通信。

电报是先将欲传送的电文(称之为消息)译成电码,使成为代表数字或字母的一系列电流脉冲(称之为电信号,简称信号),再把这些电信号传送到接收端,最后在接收端将信号译为原来的电文。

电话是将欲传送的语言或音乐(消息)转换成与之相对应的电流或电压(信号),将它传送到接收端后,利用耳机或扬声器将信号还原为声音。

可见,一个通信系统应由发送设备、传输信道和接收设备三部分组成,如图 1.1-2 所示。发送设备将欲传送的消息转换成便于



图 1.1-2 通信系统方框图

传送的电信号,在接收设备中将电信号还原为消息,发送设备与接收设备之间由传输信道沟通。传输信道有多种形式,有线通信主要用双导线、电缆(架空、地下、海底)等,无线通信、微波中继通信、卫星通信等以传播电磁波的空间为信道,新发展起来的光纤通信传输的是光信号,它的传输信道是光导纤维(简称光纤)或光缆。

在传输信道中,不可避免地会混入一些杂波(统称之为干扰),当信号微弱时,杂波的混入会给信号传输造成很大困难,因此通信

系统的主要问题之一就是提高系统的抗干扰能力。

传真和电视传送的是图象，前者传送的是固定图象，如照片、图表、手稿、资料等；后者传送的是活动图象，如舞台上的表演、生产现场的运行实况，等等。发送设备按一定规律将画面变换成相对应的电信号，该电信号在接收设备中再按一定的规律转换为光，显映在感光纸(传真)或荧光屏(电视)上。

雷达也叫无线电定位，它利用电磁波受物体反射的原理来测定空中、水面或陆地上各种目标的位置和运动参数。

为使导弹紧跟目标，可以用地面雷达测定导弹和目标的相对位置及其它运动参数。地面计算机根据雷达提供的数据计算出修正导弹航向所需的控制量，并将其转换为控制信号由地面的发送设备发出，弹上接收机收到后再传送给有关部件，以控制导弹的航行。这种用电信号控制远处机件运行的自动化技术称为遥控。遥测是利用电子学的方法测量远处各种物理量的技术。例如卫星内各部分的工作情况，宇航员的生理状况，舱内的温度、气压等。遥控遥测技术还广泛地应用于工业生产自动化、运输、医疗、钻探和科学研究等许多方面。

目前，在气象、测地、地球资源考察和管理等方面日益广泛地使用遥感技术，如矿藏的勘探、识别和测量农作物的种类和长势等。我们知道，地球上的各种目标物体(土地、水流、空气、农作物等)对电磁波反射、吸收、辐射的强度随波长而变化，不同的物体其变化规律也不相同。地球上的目标，在外界能源(如太阳光或遥感器辐射的电磁波)的照射下或其自身将向空间辐射电磁波，这些载有目标特征信息的电磁波被人造地球卫星或飞船上的遥感器所感测并转换成电信号，在星上做预处理后，将数据发回地面，地面将收到的数据经过恢复、提纯、判别等处理后提供使用。

以上种种，虽然所使用的具体设备各不相同，但都是利用不同

形式的信号传送消息(语言、音乐、图象、景物、反射电磁波、量测数据等), 它们都属于信息的传输。此外, 图象处理、数字信号处理等, 其目的是提高信号质量, 而不是传输信号。

电子科学技术的内容十分丰富, 它的高速发展, 特别是电子计算机技术的高速发展和广泛应用, 对于实现农业、工业、国防和科学技术现代化有十分重要的作用。

## § 1.2 信号和系统

### 一 信号

如前所述, 通常将欲传送的语言、文字、图象或数据等统称为消息。为了传送消息, 需要用适当的设备将消息转换为电信号(例如电话就是利用送话器把说话时声压的变化转换为相应的电流变化), 电信号简称信号<sup>①</sup>。可见, 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。

信号的形式是多种多样的, 它主要有两种结构: 连续时间信号和离散时间信号。

连续时间信号是指: 在连续时间范围内所定义的信号, 如图 1.2-1(a) 所示。需要注意的是, 这里“连续”是指时间, 至于信号的幅值可以是连续数值, 也可以不是。连续时间信号也简称为连续信号。像电话或广播的语言信号, 电视的图象信号等都是连续信号。

离散时间信号是指: 在一些离散的瞬间才有定义的信号。如图 1.2-1(b) 所示, 信号  $f(kT)$  仅在瞬间  $t=0, \pm T, \pm 2T, \dots$  才有确定的幅值(图中括号内的数值表示信号的幅值), 而在其余时间, 函数  $f(kT)$  没有定义。这里“离散”是指时间, 至于离散瞬间的

---

<sup>①</sup> 广义而言, 信号还应包括光信号、声信号等, 本书只讨论电信号。

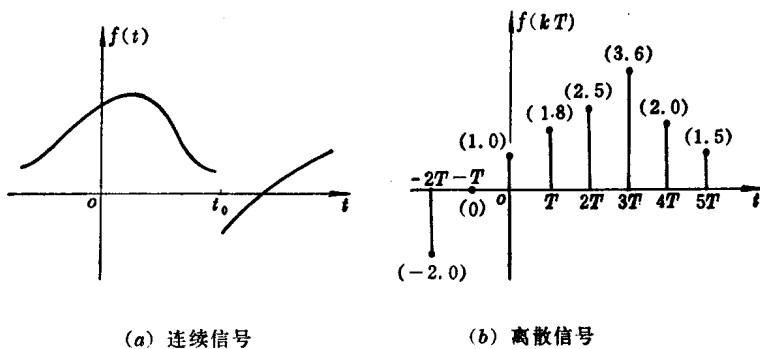


图 1.2-1 连续和离散信号

间隔,则可以是均匀的,也可以是不均匀的。离散时间信号也简称为离散信号。象雷达数据、遥控指令等都是离散信号。

信号可分为确知信号和随机信号。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。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,使信号失真(畸变),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为不规则信号。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。本书主要讨论确知信号,关于随机信号将在有关专业课程中研究。

顺便指出,由于信号常表示为时间的函数,因而在讨论与信号有关的问题时,“信号”与“函数”这两个词常常互相通用。

## 二 网络与系统

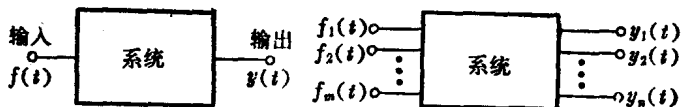
在电子技术领域内,信号、网络和系统是三个互相联系又互有区别的基本成分。信号是运载消息的工具。网络(也称为电路)是对信号加工处理的具体结构,它所研究的问题是:一定结构和参数的网络所具有的特性;或者为实现某种特性,网络应具有的结构和参数。系统<sup>①</sup>是指由一些元、器件组成的具有某种功能的总体。它可能是某个具体的网络(如滤波器)也可能是多功能的复杂设备(如通信系统、数字处理系统、计算机控制的自动化系统等)。系统主要研究的问题是:当加给具有某种传输特性的系统以输入信号时,其输出信号的情况;或者在给定条件下为使系统具备某种功能(如滤波),它应具有传输特性。相对地说,系统所关心的是全局性问题,而网络所关心的是局部性问题。

系统和网络的含义虽然不完全相同,但对于简单的系统,特别是讨论系统的基本理论时,所谓系统常常就是指网络本身。因此就本书所讨论的范围而言,“系统”与“网络”二者是互相通用的。

## 三 系统的分类

一般而言,系统(网络)的输入和输出可以是一个,也可能是多个。图 1.2-2(a) 是单一输入、单一输出的系统。输入信号常称为激励,这里用  $f(t)$  表示,输出信号常称为响应,用  $y(t)$  表示。图 1.2-2(b) 是多输入、多输出系统。

即时系统与动态系统<sup>②</sup> 我们知道,电阻是无记忆元件,全



(a) 单一输入, 单一输出系统

(b) 多输入, 多输出系统

图 1.2-2

<sup>①</sup> 这里只讨论电系统而不涉及诸如机械系统、交通运输系统等更广泛的问题。

<sup>②</sup> 请参看李瀚荪编《电路分析基础》上册,第五章。

部由无记忆元件组成的系统称为无记忆系统或即时系统，它在任意时刻的响应仅决定于该时刻的激励，而与激励的过去历史无关。即时系统可以用代数方程来描述。电感和电容是记忆元件或动态元件。包含有动态元件的系统称为记忆系统或动态系统，它在任意时刻的响应不仅与该时刻的激励有关，而且与激励的历史有关。本书主要讨论动态系统。

**连续时间系统与离散时间系统** 当输入给系统以连续时间信号时，若其输出也是连续时间信号，则称该系统为连续时间系统或简称为连续系统。当输入给系统以离散时间信号时，若其输出也是离散时间信号，则称该系统为离散时间系统或简称为离散系统，如数字计算机。实际上，离散时间系统经常与连续时间系统结合在一起使用，例如，在自动控制系统中连续时间的设备经常用数字计算机来控制，这种系统可称为混合系统。

连续时间系统可用微分方程来描述；离散时间系统用差分方程描述。

**线性系统与非线性系统** 我们将系统的激励 $f(t)$ 与其响应 $y(t)$ 之间的关系简记作

$$y(t) = L[f(t)] \quad (1.2-1)$$

式中 $L$ 是算子，它的意思可理解为：激励 $f(t)$ 经过该系统所引起的响应是 $y(t)$ 。

线性特性包含两个内容：齐次性(均匀性)和可加性。

设 $a$ 为任意常数，若系统对于激励 $af(t)$ 的响应等于该系统对于 $f(t)$ 的响应乘以 $a$ ，即

$$L[af(t)] = a \cdot L[f(t)] \quad (1.2-2)$$

则称该系统为齐次的(*homogeneous*)或均匀的。简言之，齐次性是

指,激励增大  $a$  倍时,其响应也增大  $a$  倍。有的书刊上或称它为比例性。

若系统对于激励  $f_1(t)$  与  $f_2(t)$  之和  $f_1(t)+f_2(t)$  的响应,等于对各个激励所引起的响应之和,即

$$L[f_1(t)+f_2(t)]=L[f_1(t)]+L[f_2(t)] \quad (1.2-3)$$

则称该系统为可加的(*additive*)。可加性是指,当有几个激励作用于系统时,系统的总响应等于各激励单独作用(其余激励为零)时所引起的响应之和。

如果系统既是齐次的又是可加的,则称该系统为线性的。如有激励  $f_1(t)$  和  $f_2(t)$  作用于系统,而  $a_1$  和  $a_2$  是任意常数,则对于线性系统有

$$L[a_1f_1(t)+a_2f_2(t)]=a_1 \cdot L[f_1(t)]+a_2 \cdot L[f_2(t)] \quad (1.2-4)$$

式(1.2-4)包含了式(1.2-2)和(1.2-3)的全部含意,它表示了线性系统的线性特性。

以上对于系统线性特性的讨论是粗浅的,那里没有考虑到初始条件的问题。系统的初始条件或初始状态我们用  $\{x(t_0)\}$  表示。

我们知道,动态系统的响应不仅决定于系统的激励  $f(t)$ ,而且与系统的初始条件或初始状态有关<sup>①</sup>(详见本书第五章)。

我们可以将初始条件  $\{x(t_0)\}$  看作是系统的另一个激励,这样,系统的响应将取决于两个不同的激励:输入信号  $f(t)$  和初始条件  $\{x(t_0)\}$ 。根据线性性质,线性系统的响应是  $f(t)$  和  $\{x(t_0)\}$  单独作用所引起的响应之和。若令输入信号为零时,由初始条件  $\{x(t_0)\}$  引起的响应,即零输入响应为  $y_x(t)$ ;初始状态  $\{x(t_0)\}$  为零时,由输入信号  $f(t)$  引起的响应,即零状态响应为  $y_f(t)$ ,则线性系统的响应为

---

① 请参看李瀚荪编《电路分析基础》上册,第六章。



$$y(t) = y_z(t) + y_f(t) \quad (1.2-5)$$

式(1.2-5)表明,线性系统的响应可以分成两个分量,第一个分量(零输入分量) $y_z(t)$ 是令输入为零得到的,它完全是由初始条件或初始状态引起的;第二个分量(零状态分量) $y_f(t)$ 是令初始状态为零得到的,它只是由输入信号 $f(t)$ 引起的。线性系统的这一性质(即允许我们把由初始状态和输入信号引起的响应分开)常称为分解特性。

但是单凭分解特性还不足以把系统看作是线性系统。当系统具有多个初始条件和多个输入信号时,它必须对所有的初始条件和输入信号都呈现线性特性。也就是说,当所有初始状态为零时,线性系统的零状态响应对于各输入信号应呈现线性(包括齐次性和可加性),这可称之为零状态线性;当所有输入信号为零时,线性系统的零输入响应对于各初始状态应呈现线性,这可称为零输入线性。

综上所述,一个具有分解特性,并且为零状态线性和零输入线性的系统称为线性系统。一个系统,如果不是线性的,则称为非线性系统。本书只讨论线性系统。

线性系统所具有的这种线性特性是十分重要的,我们后面将讨论的时域分析和频域分析就建立在线性特性的基础上。

**时变系统与时不变系统** 如果系统的参数是不随时间变化的,则称其为时不变系统或常参量系统,否则,称为时变系统。例如由常参数 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 组成的系统(网络)是时不变系统,而炭粒话筒是时变系统,因为它的电阻值随着讲话人声音的强弱而改变。

如果系统的参数不随时间变化,那么,系统的零状态响应与输入信号的接入时间无关,而仅决定于输入信号的波形。也就是说,如果激励 $f(t)$ 在系统引起的零状态响应为 $y_f(t)$ ,那么,当激励延迟了一定时间 $t_0$ 接入时,它所引起的响应也延迟相同的时间,即