



北京市高等教育精品教材立项项目

电路与信号

陈飞 张轶 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

北京高等教育精品教材立项项目

电 路 与 信 号

陈 飞 张 轶 主 编

北京邮电大学出版社
· 北 京 ·

内 容 简 介

本书为高等学校通信及信息管理等相关专业的教材。书中比较系统地介绍电路与信号的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分8章。内容包括电路、信号与系统的基础知识、静态电路及基本分析法、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的基本分析方法、信号的频谱分析——傅里叶分析、拉普拉斯变换及其在控制论中的应用、离散时间信号与离散时间系统分析、系统的状态变量分析法。各章配有大量例题与习题。

本书可作为高等学校通信管理、信息管理等专业学生学习电路、系统与信号等基础课程的教科书,还适于电子类各专业自学者使用,亦可供有关技术人员和高校老师参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路与信号/陈飞,张轶主编. —北京:北京邮电大学出版社,2010.3

ISBN 978-7-5635-2092-3

I. 电… II. ①陈…②张… III. ①电路分析—高等学校—教材②信号分析—高等学校—教材
IV. TM133 TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第174051号

书 名: 电路与信号

主 编: 陈 飞 张 轶

责任编辑: 刘 颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 21.25

字 数: 516千字

印 数: 1—3 000册

版 次: 2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-2092-3

定 价: 38.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

随着信息技术的迅速发展,现在很多理工类高校设有通信及信息管理等相关专业,该专业需要学习通信基础理论知识。同时由于经济学自身发展的客观需要,使得对经济系统的动态分析变得十分必要,这就需要学生掌握较多的微分方程、差分方程和现代控制理论等方面的理论分析和计算。

因此,对于通信管理专业,要求本专业学生必须对电路、信号及系统分析、变换的基本概念和分析方法等通信基本理论和系统分析理论有所掌握,但要求学生掌握的难度远不如通信、电子类专业的难度。对于通信及信息管理专业的学生则应该结合专业的特点,要求其不仅要了解理论发展的历史,还要了解各个基本理论在实际中的应用情况。目前国内极其缺乏与该要求相适应的教材,授课教师往往只能根据某些专门用于电子类的传统教材如李瀚荪的《简明电路分析基础》和郑君里的《信号与系统》自行加以取舍后对学生授课,其授课内容都局限于纯理工背景。对于该专业的学生和授课教师来说都急需一本合理编排的、难度适宜的教材。因此《电路与信号》教材的编写是针对于目前情况而采取的一个有意义的举措。

本书是在2007年“北京市高等教育精品教材建设项目”立项批准的前提下编写的。是一本针对通信管理、信息管理等专业本科以及通信工程、电子工程与信息技术等专业专科学生学习电路与信号课程编写的教科书,该书还适于电子类各专业自学者使用,亦可供有关技术人员、高校教师参考。

本书结合电子、通信、经济等专业的需要,系统讲述了电路、信号与系统两方面的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书的内容包括:电路、信号与系统的基础知识、静态电路及基本分析法、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的基本分析方法、信号的频谱分析——傅里叶分析、拉普拉斯变换及其在控制论

中的应用、离散时间信号与离散时间系统分析、系统的状态变量分析法。本课程理论教学为 51~64 学时。

本书在编写过程中,充分考虑读者对象,在内容上力求做到基本理论以必须够用为度,不片面追求理论的严密性,省略了一些不必要的数学推导和证明,而着重体现理论的应用性和针对性;在结构编排上采取了先直流后交流、先稳态后瞬态、先时域后变换域、先连续后离散的特点,使之符合由浅入深、循序渐进的认识规律。全书为配合理论列举了较多的不同类型的例题,以利于学生更好地掌握基本理论和分析方法。而且随着计算机技术和高性能数学软件(如 MATLAB 软件)的快速发展,也为通信系统、电路系统和经济系统进行仿真和动态分析创造了良好的条件。因此,本书引入了计算机仿真平台的介绍。

全书共分为 8 章,张轶编写了第 1、2、3、4 章和附录部分,陈飞编写了第 5、6、7、8 章部分,并对全书进行了整理和统稿。刘刚提供了部分素材。全书由北京邮电大学舒华英教授审阅,并提出了宝贵建议与意见,在此表示衷心感谢。同时本书在编写过程中,得到北京邮电大学电路、信号与系统教研室同事的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请广大师生及各界读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 信号与系统基本概念	1
1.1 人类通信的发展历史	1
1.2 信号及其分类	3
1.2.1 信号的基本概念	3
1.2.2 信号的分类	3
1.3 常用的典型信号	5
1.4 信号的运算	12
1.4.1 信号自变量的运算	12
1.4.2 信号的微分和积分运算	14
1.5 电路、系统的基本概念	15
1.5.1 基本概念	15
1.5.2 模型	16
1.6 系统分类	19
1.7 线性时不变系统的基本特性	20
1.8 系统分析方法	22
习题	23
第 2 章 静态电路的时域分析	26
2.1 电路分析中的基本变量	26
2.1.1 电流及其参考方向	26
2.1.2 电压及其参考方向	27
2.1.3 电流、电压关联参考方向	28
2.1.4 功率	28
2.2 基尔霍夫定律	29
2.2.1 基尔霍夫定律发现的背景	29
2.2.2 电路的基本概念	29
2.2.3 基尔霍夫电流定律	30
2.2.4 基尔霍夫电压定律	31
2.3 直流电路的基本元件	33
2.3.1 电阻元件	33

2.3.2	独立电源	34
2.3.3	受控电源	38
2.4	等效的概念及等效变换分析	39
2.4.1	电阻的串联与分压公式	40
2.4.2	电阻的并联与分流公式	41
2.4.3	T 型、 Π 型电阻网络的等效变换	41
2.4.4	电源的等效变换	43
2.5	复杂电路的系统分析方法	47
2.5.1	支路电流(电压)法	48
2.5.2	网孔电流法	49
2.5.3	节点电压法	53
2.6	电路分析基本定理	57
2.6.1	叠加定理	57
2.6.2	替代定理	60
2.6.3	戴维南定理和诺顿定理	61
2.6.4	电路的对偶特性	68
	习题	68
第 3 章	动态电路的时域分析	75
3.1	引言	75
3.2	动态元件的基本特性	76
3.2.1	电容元件	76
3.2.2	电感元件	79
3.2.3	电容、电感的串联、并联	81
3.3	连续动态电路的数学模型	83
3.4	齐次解特解系统分析方法	85
3.5	一阶动态电路的零输入响应	91
3.5.1	RC 电路的零输入响应	91
3.5.2	RL 电路的零输入响应	93
3.5.3	一阶电路的时间常数	94
3.6	一阶电路的零状态响应	96
3.6.1	RC 电路的零状态响应	97
3.6.2	RL 电路的零状态响应	98
3.7	一阶电路的全响应	100
3.7.1	电路的全响应求解	100
3.7.2	求解一阶电路的三要素公式	101
3.8	单位冲激响应	107
3.9	卷积积分	109
3.9.1	卷积的定义	109

3.9.2 卷积计算的图解法	109
3.9.3 利用卷积求系统的零状态响应	111
3.10 卷积积分的性质	113
3.10.1 卷积的代数性质	113
3.10.2 卷积的微分与积分	114
3.10.3 与冲激函数或阶跃函数的卷积	114
习题	115
第4章 正弦稳态电路的分析	119
4.1 正弦信号的基本概念	119
4.1.1 正弦信号的有效值	119
4.1.2 正弦信号的相位差	120
4.2 正弦信号的相量表示法	121
4.2.1 复数及其运算法则	121
4.2.2 正弦信号的相量表示	122
4.3 正弦电路的相量分析法	125
4.3.1 相量形式的基尔霍夫定律	125
4.3.2 电阻、电容、电感元件的复数模型	126
4.3.3 复数欧姆定律的一般形式、阻抗和导纳	131
4.3.4 正弦电路的相量分析法举例	134
4.4 正弦电路的功率	137
4.4.1 瞬时功率	137
4.4.2 平均功率(有功功率)与无功功率	138
4.4.3 复功率	139
4.4.4 视在功率与功率因数	139
4.4.5 功率平衡	141
4.4.6 最大功率传输	141
4.5 三相电路的概念	143
4.5.1 三相电路简介	143
4.5.2 对称三相电路计算的特点	145
4.5.3 不对称三相电路的概念	146
4.5.4 三相电路的功率	147
习题	148
第5章 连续时间信号与系统的频域分析	151
5.1 信号的分解	151
5.1.1 信号的正交分解	151
5.1.2 完备正交函数集	153
5.2 周期信号的傅里叶级数分析	153

5.2.1	周期信号的指数形式的傅里叶级数	154
5.2.2	三角形傅里叶级数	154
5.2.3	信号的对称性与傅里叶级数的关系	155
5.3	周期信号的频谱分析	157
5.3.1	频谱的概念	157
5.3.2	周期信号的频谱特征	158
5.3.3	信号的有效带宽	161
5.3.4	平均功率	162
5.4	非周期信号的频谱分析——傅里叶变换	165
5.4.1	非周期信号的傅里叶变换	166
5.4.2	非周期信号的频谱	166
5.4.3	傅里叶变换存在的条件	167
5.5	典型信号的傅里叶变换	168
5.6	周期信号的傅里叶变换	172
5.7	傅里叶变换的性质	174
5.8	功率谱与能量谱	184
5.8.1	能量信号与功率信号	185
5.8.2	能量谱	186
5.8.3	功率谱	186
5.9	连续时间 LTI 系统的频域分析	187
5.10	无失真传输系统	189
5.11	理想低通滤波器的响应	190
5.11.1	理想低通滤波器的冲激响应	190
5.11.2	理想低通滤波器的阶跃响应	191
5.12	信号的时域抽样与抽样定理	193
5.12.1	信号的时域抽样	193
5.12.2	抽样定理	195
5.12.3	信号的重建	196
5.13	调制与解调	197
5.13.1	正弦振幅调制	198
5.13.2	同步解调	199
5.14	频分复用与时分复用	200
5.14.1	频分复用	200
5.14.2	时分复用	201
	习题	202
第 6 章	拉普拉斯变换分析法	206
6.1	引言	206
6.1.1	拉普拉斯变换的发展过程	206

6.1.2 复频域分析法	206
6.2 拉普拉斯变换的定义	207
6.2.1 从傅里叶变换导出拉氏变换	207
6.2.2 拉氏变换的收敛域	208
6.3 典型信号的拉氏变换	212
6.4 单边拉氏变换的性质	213
6.5 拉普拉斯反变换	220
6.5.1 部分分式法	221
6.5.2 $F(s)$ 是无理分式	224
6.6 连续时间 LTI 系统的复频域分析	224
6.7 电路的复频域分析法	225
6.8 系统函数 $H(s)$	229
6.9 $H(s)$ 的零极点分布与时域特性 $h(t)$ 的关系	231
6.10 系统的稳定性分析	233
6.11 几何矢量分析法简介	235
6.11.1 系统的频率响应特性	235
6.11.2 根据 $H(s)$ 零极点图绘制系统的频响特性曲线	235
习题	237
第 7 章 离散时间信号与系统的分析	241
7.1 离散时间信号的时域表示	242
7.2 序列的基本运算与典型序列	244
7.2.1 离散信号的运算	244
7.2.2 典型的离散序列	247
7.3 离散时间系统及其数学模型	251
7.3.1 离散时间系统的分类	251
7.3.2 离散时间系统的数学模型	252
7.3.3 系统框图	253
7.4 离散时间系统的时域分析	253
7.5 用离散卷积求零状态响应	258
7.5.1 单位样值响应	258
7.5.2 离散系统的卷积和	258
7.5.3 卷积的计算	260
7.5.4 用单位样值响应表示的因果条件与稳定条件	261
7.5.5 系统的互联	261
7.6 z 变换	261
7.6.1 z 变换的发展历程	261
7.6.2 z 变换的定义	262
7.6.3 零极点的概念	265

7.7 z 变换的性质	266
7.8 逆 z 变换	268
7.9 离散时间系统 z 域分析	271
7.9.1 用 z 变换解差分方程	271
7.9.2 系统函数 $H(z)$	271
7.9.3 系统函数的零极点分布对系统特性的影响	272
习题	274
第 8 章 状态变量分析法	278
8.1 状态和状态变量	278
8.1.1 状态方程的引出	278
8.1.2 状态变量分析法的名词	279
8.1.3 状态变量分析法的优点	281
8.2 连续时间系统状态方程的建立	281
8.2.1 连续时间系统状态方程的普遍形式	281
8.2.2 直接列写系统的状态方程	282
8.2.3 间接列写系统的状态方程	283
8.3 离散时间系统的状态方程	284
8.4 连续时间系统状态方程的求解	288
8.5 离散时间系统状态方程的求解	291
8.6 由状态方程判定系统的稳定性	293
8.7 系统的能控性和能观测性	296
8.7.1 系统的能控性	297
8.7.2 系统的能观测性	300
习题	301
附录 A MATLAB 简介	304
附录 B 习题答案	314
参考文献	329

第 1 章 信号与系统基本概念

1.1 人类通信的发展历史

从古至今,人们曾寻求各种方法实现将携带有某种消息的信号快速、高效地传输。在远古时期,人们通过简单的语言、壁画等方式交换信息。千百年来,人们一直在用语言、图符、钟鼓、烟火、竹简、纸书等传递信息,古代人的烽火狼烟、飞鸽传信、驿马邮递就是这方面的例子。现在还有一些地区的个别原始部落,仍然保留着诸如击鼓鸣号这样古老的通信方式。在现代社会中,交警的指挥手语、航海中的旗语等不过是古老通信方式进一步发展的结果。这些信息传递的基本方式都是依靠人的视觉与听觉。

19 世纪中叶以后,随着电报、电话的发明,电磁波的发现,人类通信领域产生了根本性的巨大变革,实现了利用金属导线来传递信息,甚至通过电磁波来进行无线通信。从此,人类的信息传递可以脱离常规的视听觉方式,用电信号作为新的载体,并由此带来了一系列新技术革新,开始了人类通信的新时代。

1837 年,美国人塞缪尔·莫尔斯成功地研制出世界上第一台电磁式电报机。他利用自己设计的电码,将信息转换成一串或长或短的电脉冲传向目的地,再在目的地转换为原来的信息。1844 年 5 月 24 日,莫尔斯在国会大厦联邦最高法院会议厅用“莫尔斯电码”发出了人类历史上的第一份电报,从而实现了长途电报通信。1864 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了一套电磁理论,预言了电磁波的存在,说明了电磁波与光具有相同的性质,两者都是以光速传播的。1888 年,德国青年物理学家海因里希·赫兹(H. R. Hertz)用电波环进行了一系列实验,发现了电磁波的存在,他用实验证明了麦克斯韦的电磁理论。这个实验轰动了整个科学界,促使了无线电的诞生和大力推动了电子技术的发展,成为近代科学技术史上的一个重要里程碑。电磁波的发现产生了巨大影响。不到 6 年的时间,俄国的波波夫、意大利的马可尼分别发明了无线电报,实现了信息的无线电传播,其他的无线电技术也如雨后天春笋般涌现出来。

1904 年英国电气工程师弗莱明发明了二极管。1906 年美国物理学家费森登成功地研究出无线电广播。1907 年美国物理学家德福莱斯特发明了真空三极管,美国电气工程师阿姆斯特朗应用电子器件发明了超外差式接收装置。1920 年美国无线电专家康拉德在匹兹堡建立了世界上第一家商业无线电广播电台,从此广播事业在世界各地蓬勃发展,收音机成为人们了解时事新闻的方便途径。1924 年第一条短波通信线路在瑙恩和布宜诺斯艾利斯之间建立,1933 年法国人克拉维尔建立了英法之间的第一个商用微波无线电路,推动了

无线电技术的进一步发展。

电磁波的发现也促使图像传播技术迅速发展起来。1922年,16岁的美国中学生菲罗·法恩斯沃斯设计出第一幅电视传真原理图,1929年申请了发明专利,被裁定为发明电视机的第一人。1928年美国西屋电器公司的兹沃尔金发明了光电显像管,并同工程师范瓦斯合作,实现了电子扫描方式的电视发送和传输。1935年美国纽约帝国大厦设立了一座电视台,次年就成功地把电视节目发送到70 km以外的地方。1938年兹沃尔金又制造出第一台符合实用要求的电视摄像机。经过人们的不断探索和改进,1945年在三基色工作原理的基础上美国无线电公司制成了世界上第一台全电子管彩色电视机。1946年,美国人罗斯·威玛发明了高灵敏度摄像管,同年日本人八本教授解决了家用电视机接收天线问题,从此一些国家相继建立了超短波转播站,电视迅速普及开来。

图像传真也是一项重要的通信。自从1925年美国无线电公司研制出第一台实用的传真机以后,传真技术不断革新。1972年以前,该技术主要用于新闻、出版、气象和广播行业;1972—1980年,传真技术已完成从模拟向数字、从机械扫描向电子扫描、从低速向高速的转变,除代替电报和用于传送气象图、新闻稿、照片、卫星云图外,还在医疗、图书馆管理、情报咨询、金融数据、电子邮政等方面得到应用;1980年后,传真技术向综合处理终端设备过渡,除承担通信任务外,它还具备图像处理和数据处理的能力,成为综合性处理终端。静电复印机、磁性录音机、雷达、激光器等都是信息技术史上的重要发明。

此外,作为信息超远控制的遥控、遥测和遥感技术也是非常重要的技术。遥控是利用通信线路对远处被控对象进行控制的一种技术,用于电气事业、输油管道、化学工业、军事和航天事业;遥测是将远处需要测量的物理量如电压、电流、气压、温度、流量等变换成电量,利用通信线路传送到观察点的一种测量技术,用于气象、军事和航空航天业;遥感是一门综合性的测量技术,在高空或远处利用传感器接收物体辐射的电磁波信息,经过加工处理或能够识别的图像或电子计算机用的记录磁带,提示被测物体的性质、形状和变化动态,主要用于气象、军事和航空航天事业。

随着电子技术的高速发展,军事、科研迫切需要解决的计算工具也大大改进。1946年美国宾夕法尼亚大学的埃克特和莫希里研制出世界上第一台电子计算机。电子元器件材料的革新进一步促使电子计算机朝小型化、高精度、高可靠性方向发展。20世纪40年代,科学家们发现了半导体材料,用它制成晶体管,替代了电子管。1948年美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉坦发明了晶体三极管,于是晶体管收音机、晶体管电视、晶体管计算机很快代替了各式各样的真空电子管产品。1959年美国的基尔比和诺伊斯发明了集成电路,从此微电子技术诞生了。1967年大规模集成电路诞生了,一块米粒般大小的硅晶片上可以集成1000多个晶体管的线路。1977年美国、日本科学家制成超大规模集成电路,30 mm²的硅晶片上集成了13万个晶体管。微电子技术极大地推动了电子计算机的更新换代,使电子计算机显示了前所未有的信息处理功能,成为现代高新科技的重要标志。

为了解决资源共享问题,单一计算机很快发展成计算机联网,实现了计算机之间的数据通信、数据共享。通信介质从普通导线、同轴电缆发展到双绞线、光纤导线、光缆;电子计算机的输入输出设备也飞速发展起来,扫描仪、绘图仪、音频视频设备等,使计算机如虎添翼,可以处理更多的复杂问题。20世纪80年代末多媒体技术的兴起,使计算机具备了综合处理文字、声音、图像、影视等各种形式信息的能力,日益成为信息处理最重要和必不可少的工具。

在众多科学家年复一年的不懈努力下,信号传递在距离、速度、可靠性、有效性方面得到了明显的改善。现代通信技术有望使得任何人在任何时候和任何地方都能够和世界上其他人进行通信。随着国内 3G 牌照的发放和运营商 3G 业务的开展,人们可以更便利地使用手持通信机,以个人相应的电话号码呼叫或被呼叫,进行语音、图像、数据等各种多媒体信号的传输。电子计算机和通信技术的紧密结合,标志着数字化信息时代的到来。

在电子信息领域,常常要利用通信系统、控制系统和计算机系统将含有特定消息的电信号进行传输、交换和处理。信号传输、信号交换和信号处理相互密切联系,又各自形成了相对独立的学科体系。它们共同的理论基础之一是研究信号的基本性能或者说进行信号分析,包括信号的描述、分解、变换、检测、特征提取以及为适应指定要求而进行信号设计。信息技术(Information Technology, IT)就是以微电子和光电技术为基础,以计算机和通信技术为支撑,以信息处理技术为主题的技术系统的总称,是一门综合性的技术。

1.2 信号及其分类

1.2.1 信号的基本概念

对于信号和消息的确切定义是一个很复杂的问题,可以从两者的相互关系上简单理解为:信号是消息的表现形式,消息是信号的具体内容。而描述信号的基本方法是写出它的数学表达式,此表达式是时间的函数,绘出函数的图形称为信号的波形。为便于讨论,在本书中常常把信号与函数两名词通用。除了表达式与波形这两种直观的描述方式之外,随着问题的深入,需要用频谱分析、各种正交变换以及其他方式来描述和研究信号。

1.2.2 信号的分类

信号可以从不同角度进行分类。

1. 确定性信号与随机信号

若信号被表示为以确定的时间函数,对于指定的某一时刻,可确定其相应的函数值,这种信号称为确定性信号或规则信号,例如我们熟知的正弦信号。

但是,实际传输的信号往往具有不可预知的不确定性,这种信号被称为随机信号或不确定性信号。如果通信系统中传输的信号都是确定的时间函数,接收者就不可能用它得知任何新的消息,这样也就失去了通信的意义。此外,在信号传输过程中,不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响,这些干扰和噪声都具有随机特性。对于随机信号,不能给出确切的时间函数,只可能知道它的统计特性,如在某时刻取某一数值的概率。作为理论上的抽象,应该首先研究确定性信号,在此基础之上才能根据随机信号的统计规律进一步研究随机信号的特性。

2. 周期信号与非周期信号

规则信号又可分为周期信号和非周期信号。所谓的周期信号就是依一定时间间隔周而复始,而且是无始无终的信号,其表达式为

$$f(t) = f(t + nT), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (\text{任意整数}) \quad (1-1)$$

满足此关系式的最小 T 值称为信号的周期。只要给出此信号在任一周期内的变化过程,便可确知它在任意时刻的数值。非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。若令周期信号的周期 T 趋于无限大,则成为非周期信号。

具有相对较长周期的确定性信号可以构成所谓“伪随机信号”,从某一时段来看,这种信号似无规律,而经一定周期之后,波形严格重复。利用这一特点产生的伪随机信号在通信系统中得到广泛应用。本书中着重讨论确定性信号分析(包括各种周期性和非周期性信号)。

3. 连续时间信号与离散时间信号

按照时间函数取值的连续性与离散性可将信号划分为连续时间信号与离散时间信号,简称连续信号与离散信号。

如果在所讨论的时间间隔内,除若干不连续点之外,对于任意时间值都可给出确定的函数值,此信号就称为连续信号。例如正弦波或图 1-1 所示矩形脉冲都是连续信号。连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的(只取某些确定值)。时间和幅值都连续的信号又称为模拟信号。语音通信中需要第一个解决的问题是把声音通过电话机变成模拟的电信号。

在实际应用中,模拟信号与连续信号两名词往往不予区分。

与连续信号相对应的是离散信号。离散信号在时间上是离散的,只在某些不连续的规定瞬间给出函数值,在其他时间没有定义,如图 1-2 所示。此图对应的函数 $x(t)$ 只在 $t = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 离散时刻给出函数值 $2.1, -1, 1, 2, 0, 4.3, -2, \dots$ 。给出函数值的离散时刻的间隔可以是均匀的(如图 1-2 所示),也可以是不均匀的。一般情况都采用均匀间隔。这时,自变量 t 简化为用整数序号 n 表示,函数符号写为 $x(n)$,仅当 n 为整数时 $x(n)$ 才有定义。离散时间信号也可认为是一组序列值的集合,以 $\{x(n)\}$ 表示。

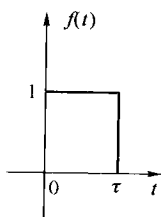


图 1-1 矩形脉冲

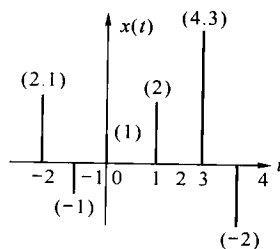


图 1-2 离散脉冲(抽样信号)

如果离散时间信号的幅值是连续的,又可取名为抽样信号,如图 1-2 所示。另一种情况是离散时间信号的幅值也被限定为某些离散值,即时间与幅度取值都具有离散性,这种信号

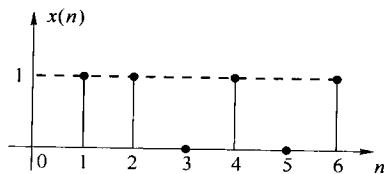


图 1-3 数字信号

又称为数字信号,如在图 1-3 中,各离散时刻的函数取值只能是“0”、“1”二者之一。此外,还可以有幅值为多个离散值的多电平数字信号。

自然界的实际信号可能是连续的,也可能是离散的时间信号。如声道产生的语音、乐器发出的乐音、连续测量的温度曲线都是连续时间信号,而银行发布利率、按固定时间间隔给出的股票市场指数、按年度或月份统计的人口数量或国民生产总值都是离散时间信号。本章着重研究连续

时间信号,第7章集中研究离散时间信号。

除以上划分方式外,还可将信号分为能量受限信号与功率受限信号,以及调制信号、载波信号和已调信号等。在本书中将根据各章的需要陆续介绍。

1.3 常用的典型信号

下面给出一些典型的连续时间信号表达式和波形,今后经常遇到这些信号。

1. 指数信号

指数信号的表达式为

$$f(t) = Ke^{at} \quad (1-2)$$

式中 a 是实数。若 $a > 0$, 信号将随时间增长, 若 $a < 0$, 信号则随时间衰减, 在 $a = 0$ 的特殊情况下, 信号不随时间变化, 成为直流信号。常数 K 表示指数信号在 $t = 0$ 点的初始值。指数信号的波形如图 1-4 所示。

指数 a 的绝对值大小反映了信号增长或衰减的速率, $|a|$ 越大, 增长或衰减的速率越快。通常, 把 $|a|$ 的倒数称为指数信号的时间函数, 记为 τ , 即 $\tau = \frac{1}{|a|}$, τ 越大, 指数信号增长或衰减的速率越慢。

实际上, 较多遇到的是衰减指数信号, 例如图 1-5 所示的波形, 其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ e^{-\frac{t}{\tau}}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

在 $t = 0$ 点, $f(0) = 1$, 在 $t = \tau$ 处, $f(\tau) = \frac{1}{e} = 0.368$ 。也即经时间 τ , 信号衰减到原始信号的 36.8%。

指数信号的一个重要特征是它对时间的微分和积分仍然是指数形式。

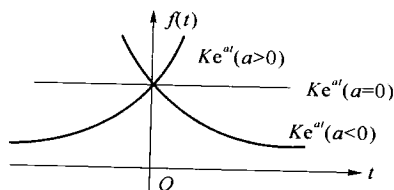


图 1-4 指数信号

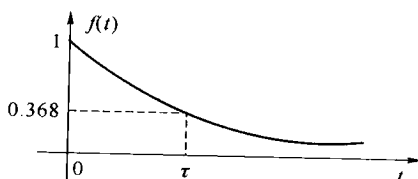


图 1-5 单边指数衰减信号

2. 正弦信号

正弦信号和余弦信号二者之间仅在相位上相差 $\frac{\pi}{2}$, 经常统称为正弦信号, 一般写为

$$f(t) = K \sin(\omega t + \theta) \quad (1-4)$$

式中 K 为振幅, ω 为角频率, θ 称为初相位。其波形如图 1-6 所示。

正弦信号是周期信号, 其周期 T 与角频率 ω 和频率 f 满足下列关系式:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (1-5)$$

在信号与系统分析中,有时会遇到衰减的正弦信号,波形如图 1-7 所示,此正弦振荡的幅度按指数规律衰减,其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ K e^{-\alpha t} \sin \omega t, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

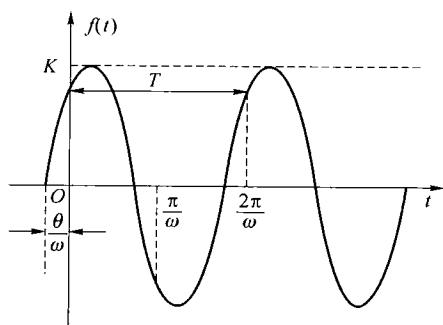


图 1-6 正弦信号

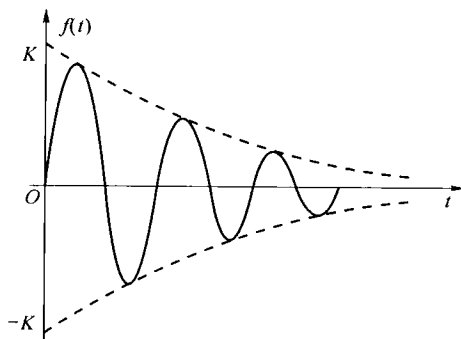


图 1-7 指数衰减的正弦信号

正弦信号和余弦信号常借助复指数信号来表示。由欧拉公式可知:

$$\begin{cases} e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t \\ e^{-j\omega t} = \cos \omega t - j \sin \omega t \end{cases} \quad (1-7)$$

所以有

$$\sin \omega t = \frac{1}{2j} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) \quad (1-8)$$

$$\cos \omega t = \frac{1}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \quad (1-9)$$

这是今后经常要用到的两对关系式。

与指数信号的性质类似,正弦信号对时间的微分与积分仍为同频率的正弦信号。

3. 复指数信号

如果指数信号的指数因子为一复数,则称之为复指数信号,其表达式为

$$f(t) = K e^{st} \quad (1-10)$$

其中 $s = \sigma + j\omega$, σ 为复数 s 的实部, ω 是其虚部。借助欧拉公式将式(1-7)展开,可得

$$K e^{st} = K e^{(\sigma + j\omega)t} = K e^{\sigma t} \cos \omega t + j K e^{\sigma t} \sin \omega t \quad (1-11)$$

此结果表明,一个复指数信号可分解为实、虚两部分。其中实部包含余弦信号,虚部则为正弦信号。指数因子的实部 σ 表征了正弦与余弦函数振幅随时间变化的情况。指数因子的虚部 ω 则表示正弦与余弦信号的角频率。

- 若 $\sigma > 0, \omega = 0$, 即 s 为实数, 则复指数信号表示增长的指数信号;
- 若 $\sigma < 0, \omega = 0$, 则复指数信号表示衰减的指数信号;
- 当 $\sigma = 0, \omega \neq 0$, 即 s 为虚数, 则复指数信号表示等幅振荡的正弦、余弦信号;
- 若 $\sigma > 0, \omega \neq 0$, 则复指数信号表示增幅振荡的正弦、余弦信号;
- 若 $\sigma < 0, \omega \neq 0$, 则复指数信号表示减幅振荡的正弦、余弦信号;
- 若 $\sigma = 0$ 且 $\omega = 0$, 即 s 等于零, 则复指数信号的实部与虚部都与时间无关, 成为直流信号。