

面向21世纪高等学校精品规划教材
电子信息类

XINHAO

YU XITONG

信号

与系统

主 编 董作霖

面向 21 世纪高等学校精品规划教材·电子信息类

信号与系统

主编 董作霖

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书为本科电子信息工程、通信工程专业《信号与系统》课程的教材。全书共分6章,内容包括信号与系统的基本概念、连续信号与系统的时域分析、连续信号与系统的频域分析、连续信号与系统的复频域分析、离散信号与系统的时域分析、 z 域分析等,附录中包括 Matlab 软件的使用介绍和傅立叶变换等内容。在使用本教材时,对于各章内容的取舍,可根据实际情况确定。

本书适用于电子信息工程、通信工程等相关专业学生。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/董作霖主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007. 6

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1140 - 6

I. 信… II. 董… III. 信号系统 - 高等学校 - 教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 082810 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](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 $\times$ 960 毫米 1/16

印 张 / 15

字 数 / 300 千字

版 次 / 2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 2000 册

定 价 / 23.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

出版说明

电子信息技术的发展水平是衡量一个国家现代化水平和综合国力的重要标志,是我国今后 20 年高科技发展的重点。目前,随着我国电子信息技术及理论研究的快速发展,电子信息技术各个领域急需大量的应用型工程技术人员。他们既掌握着比较丰富的基础理论知识,又具有比较强的动手能力和一定的专业实践经验,能够在实际工作中比较好地分析问题、解决问题;有较高的综合素质,能够在基层一线对自己所从事的工作和工程实际问题进行研究、探索,能够组织工程项目的实施。

近年来新建本科院校大都以应用型为办学定位,形成了一批占全国本科高校总数近 30% 的、与传统本科院校不同的应用型本科院校。教材是教学的主要依据,也是教学改革的重要组成部分。教学改革的种种设想和试验,大多要通过教材建设来具体体现;教材建设反过来又推动和促进教学改革。面对高等教育对象的扩展、教学模式的变革、教材内容需求的变化,为了更好地适应当前我国高等教育这种发展的需要,满足我国高校对电子信息类应用型人才培养的各种要求,北京理工大学出版社组织知名专家、学者,以培养应用型人才为主题进行深入的研讨,确立了电子信息类应用型本科教材的出版规划。

本套教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 定位明确。针对应用型本科“理论基础扎实,专业知识面广,实践能力强,综合素质高,并有较强的科技运用、推广、转换能力”的特点,在选择教材内容和确立编写体系时注意体现素质教育、创新能力与实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。

(2) 注重培养学生职业能力。电子信息类专业学生要能紧跟电子信息产业的迅

速发展，要有较强的适应工作的能力，具备使用先进应用软件的能力，在此套教材中强调培养学生利用诸如 protel、maxplusII、multisim、matlab 等工具软件进行电路设计和仿真调试的能力。

(3) 体系完整。此套教材包括了电子信息工程和通信工程的专业基础课和部分专业选修课。

(4) 保证质量。本套教材大多是在已经在学生中用过几轮并且经实际验证比较优秀的课程讲义的基础上形成的。在教材出版后我们将选择并安排一部分比较好的优秀教材修订再版，逐步形成精品教材。

(5) 提供教学包。可在北京理工大学出版社网站 [www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn) 下载。

本套教材可作为应用型本科院校电子信息工程、通信工程等专业的课程教学用书，也可以作为电子信息技术的技能培训用书。



前 言

本书在编写上立足应用型本科电子信息类专业的培养目标,在基本理论和方法的阐述上,把物理问题与其数学表述和论证结合起来,引入现代数学的概念,使读者更能深入准确地理解本书的内容。在编写的过程中,力求做到基本概念叙述清楚,理论联系实际,例题较为丰富,便于自学。

全书共分 6 章,内容包括信号与系统的基本概念、连续信号与系统的时域分析、连续信号与系统的频域分析、连续信号与系统的复频域分析、离散信号与系统的时域分析、 z 域分析等,附录中包括 Matlab 软件的使用介绍和傅立叶变换等内容。在使用本教材时,对于各章内容的取舍,可根据实际情况确定。

本书由董作霖副教授主编并编写第 2 章和第 5 章的 5.4—5.6 节,李雪编写第 1 章,李明编写第 3 章的 3.1—3.5 节,郭静编写第 3 章的 3.6 节和附录,王普明编写第 4 章,李静编写第 5 章的 5.1—5.3 节,闵茹编写第 6 章。本书由王俊鲲鹏教授和张亚华教授担任主审,并提出许多宝贵意见,在此深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 信号与系统的基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 信号	1
1.3 信号的基本运算	5
1.4 几种常见信号	9
1.5 系统的描述	12
1.6 系统的性质	15
1.7 LTI 系统分析	18
小结	18
习题	19
第 2 章 连续信号与系统的时域分析	20
2.1 引言	20
2.2 系统微分方程的建立及算子表示	20
2.3 系统的零输入响应	27
2.4 单位冲激函数	32
2.5 系统的单位冲激响应和零状态响应	38
2.6 卷积积分	48
2.7 系统的时域分析法举例	56
小结	58
习题	59
第 3 章 连续信号与系统的频域分析	62
3.1 引言	62
3.2 信号分解为正交函数组合	62
3.3 周期信号的分解——傅立叶级数	65
3.4 非周期信号的分解——傅立叶变换	71
3.5 傅立叶变换的性质	80



3.6 傅立叶变换的应用.....	88
小结	96
习题	97
第4章 连续信号与系统的复频域分析	102
4.1 引言	102
4.2 拉普拉斯变换.....	102
4.3 单边拉普拉斯变换的性质.....	108
4.4 拉普拉斯逆变换.....	111
4.5 连续系统的复频域分析.....	116
4.6 s 域的网络模型法或运算电路法	118
4.7 连续信号的信号流图.....	121
4.8 系统函数与系统特性.....	123
小结	127
习题	127
第5章 离散信号与系统的时域分析	129
5.1 引言	129
5.2 卷积和	139
5.3 离散系统算子方程.....	144
5.4 差分方程的经典解.....	149
5.5 离散系统零输入响应.....	152
5.6 离散系统零状态响应.....	155
小结	162
习题	163
第6章 离散信号与系统的 z 域分析	168
6.1 引言	168
6.2 Z 变换	168
6.3 Z 逆变换	179
6.4 离散系统的 z 域分析	184
小结	191
习题	192



附录 1 Matlab 软件简介	196
附录 2 常用因果系统的转移算子与单位冲激响应表	208
附录 3 常用信号的傅立叶变换表	209
附录 4 傅立叶变换的性质	211
习题答案	213
参考文献	228

第 1 章 信号与系统的基本概念

1.1 引 言

在各种领域中，信号与系统的概念出现的极为广泛，而与其相关的分析思想和分析方法在很多科学技术领域起着很重要的作用。一般将语言、文字、图像或数据统称为消息，而信号是指消息的表现形式与传送载体，信息指消息中赋予人们的新知识、新概念等。电信号是应用最广泛的物理量，如电压、电流、电荷等。总之，信号是消息的表现形式与传送载体，消息是信号的传送内容，如电信号传送声音、图像、文字等。

系统（System）指由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的，具有稳定功能的整体，如太阳系、通信系统、控制系统、经济系统、生态系统等。系统可以看成是变换器、处理器。在电子技术领域中，“系统”、“电路”、“网络”三个名词在一般情况下可以通用。

信号的概念与系统的概念是紧密相连的。信号在系统中按一定规律运动、变化，系统在输入信号的驱动下对它进行“加工”、“处理”并发送输出信号，如图 1-1 所示，输入信号常称为激励，输出信号常称为响应。

在电子系统中，系统通常是电子线路，信号是随时间变化的电压或电流（有时可能是电荷或磁通），即电信号，它是现代科学技术中应用最广泛的信号。本书将只涉及电信号。

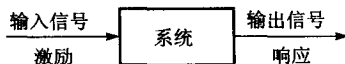


图 1-1 系统模拟图

信号处理是指对信号进行某种加工或变换，其目的是消除信号中的多余内容，滤除混杂的噪声和干扰，将信号变换成容易分析与识别的形式，便于估计和选择它的特征参量。信号处理的应用已遍及许多科学技术领域。

本章讨论信号与系统的基本概念和基本分析方法，着重引入信号与系统的数学描述及表示方法，为后续章节的学习奠定基础。

1.2 信 号

1.2.1 信号的描述

信号是消息的表现形式，通常表现为随若干变量而变化的某种物理量。在数学上，可以



描述为一个或多个独立变量的函数。例如，在电子信息系统中，常用的电压、电流、电荷或磁通等电信号可以理解为时间 t 或其他变量的函数；又如，在气象观测中，有探空气球携带仪器测量得到的温度、气压等数据信号，可以看成是随海拔高度 h 变化的函数；再如，在图像处理系统中，描述平面黑白图像像素灰度变化的图像信号，可以表示为平面坐标位置 (x, y) 的函数，等等。因此，后面常把“信号”与“函数”两个名词通用。

为了对信号进行处理或传输，要对信号的特性进行分析研究。这既可以从信号随时间变化的快、慢、延时来分析信号时间特性，也可以从信号所包含的主要频率分量的振幅大小、相位的多少来分析信号的频率特性。当然，不同的信号具有不同的时间特性与频率特性。

若信号是单个独立变量的函数，则称这种信号为一维信号。一般情况下，信号为 n 个独立变量的函数时，就称为 n 维信号。本书只讨论一维信号。为方便起见，一般将信号的自变量设为时间 t 或序号 n 。对于离散信号，亦可称为序列。因此，信号与函数、序列这三个名词是通用的。信号的函数关系可以用数学表达式、波形图、数据表等表示，其中数学表达式、波形图是最常用的表示形式，如下所示。

时域分析数学表达式——时间的函数，如 $f(t) = \sin t$ 。

频域分析数学表达式——频率的函数，如 $F(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega}$ 。

信号波形表示——函数的图像，如 $f(t) \sim t$ 或 $F(j\omega) \sim \omega$ 。

1.2.2 信号的分类

根据信号的特性，可以对常用信号进行分类。

1. 连续信号和离散信号

根据信号按自变量时间 t (或其他量) 取值在定义域内的连续与否可分为连续时间信号与离散时间信号，分别简称为连续信号与离散信号。

1) 连续时间信号

连续时间信号自变量 t 的取值在定义域内是连续的，而信号的值域可以是连续的，也可以不是连续的。电路基础课程中所引入的信号都是连续信号。如图 1-2 (a) 中的信号

$$f(t) = 5\sin(\pi t) \quad -\infty < t < \infty$$

在定义域 $(-\infty, \infty)$ 和值域 $[-5, 5]$ 都是连续的。如图 1-2 (b) 中的信号

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < -1 \\ 2 & -1 \leq t < 1 \\ -2 & 1 \leq t < 3 \\ 0 & t \geq 3 \end{cases}$$

其定义域是连续的，但其函数值只取 -2、0、2 三个离散的值。



若函数 $f(t)$ 在 $t=t_0$ 处有间断点, 则函数在该点的值等于其左极限 $f(t_{0-})$ 与右极限 $f(t_{0+})$ 之和的 $1/2$, 即

$$f(t_0) = \frac{1}{2} [f(t_{0-}) + f(t_{0+})]$$

这样, 信号在定义域 $(-\infty, \infty)$ 均有确定的函数值。图 1-2 (c) 所示的单位阶跃信号定义为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2} & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

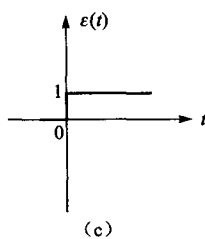
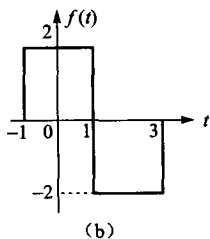
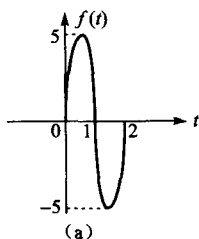


图 1-2 连续时间信号

2) 离散时间信号

离散时间信号自变量 t 的取值在定义域内是离散的, 信号的值域可以是连续的, 也可以是不连续的, 如图 1-3 所示的信号。离散信号也常称为序列。

$$f(n) = \begin{cases} 0 & n < -1 \\ 1 & n = -1 \\ 2 & n = 0 \\ -1.5 & n = 1 \\ 0 & n \geq 2 \end{cases}$$

2. 周期信号和非周期信号

在规则信号中, 又可分为周期信号与非周期信号。所谓周期信号, 是指信号在定义区间 $(-\infty, \infty)$ 依一定时间间隔 T 按相同规律周而复始变化, 而且是无始无终的信号。而时间上不满足周而复始特性的信号称为非周期信号。

连续周期信号可表示为

$$f(t) = f(t + mT), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad -\infty < t < \infty$$

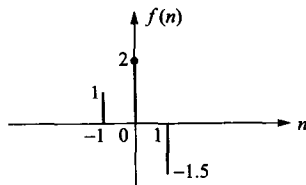


图 1-3 离散时间信号



如半波整流信号, 如图 1-4 所示。

离散周期信号可表示为

$$f(n) = f(n + mN), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

如锯齿序列, 如图 1-5 所示。

周期信号有三个特点:

- (1) 周期信号必须在时间上是无始无终的, 即自变量时间 t 的定义域为 $t \in \mathbf{R}$ 。
- (2) 随时间变化的规律必须具有周期性, 其周期为 T 。
- (3) 在各周期内信号的波形完全一样。

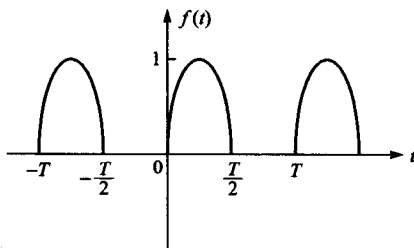


图 1-4 半波整流信号

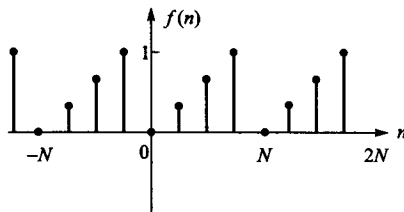


图 1-5 锯齿序列

3. 确定性信号与随机性信号

对于确定的时刻, 若信号有确定的数值与之对应, 则这样的信号称为确定性信号。例如, 图 1-6 所示的信号为确定性信号。不可预知的信号称为随机信号。例如, 在信号传输过程中, 加到信道里面的干扰信号即为随机信号。如图 1-7 所示的信号为随机信号。

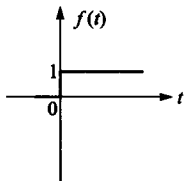


图 1-6 确定性信号

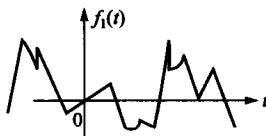


图 1-7 随机信号

4. 能量信号和功率信号

如果把信号 $f(t)$ 看成是随时间变化的电压和电流, 则当信号 $f(t)$ 通过 1Ω 电阻时, 信号在时间间隔 $-T \leq t \leq T$ 内所消耗的能量称为归一化能量, 即

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt$$

而在上述时间间隔 $-T \leq t \leq T$ 内的平均功率称为归一化功率, 即



$$P = \frac{1}{2T} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt$$

若信号 $f(t)$ 的能量有界 (即 $0 < W < \infty$, 这时 $P = 0$), 则称其为能量有限信号, 简称能量信号。

若信号 $f(t)$ 的功率有界 (即 $0 < P < \infty$, 这时 $W = 0$), 则称其为功率有限信号, 简称功率信号。

5. 有时限信号与无时限信号

若在有限时间区间 $(t_1 < t < t_2)$ 内信号 $f(t)$ 存在, 而在此时间区间以外, 信号 $f(t) = 0$, 则此信号即为有时限信号, 简称时限信号。否则称为无时限信号。

1.3 信号的基本运算

1.3.1 信号的相加与相乘

1. 信号的时域相加

两个信号相加, 其和信号等于对应时刻的两函数值相加, 如图 1-8 所示。

2. 信号的时域相乘

两个信号相乘, 其积信号等于对应时刻的两函数值相乘, 如图 1-9 所示。

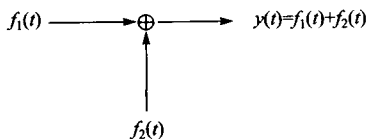


图 1-8 信号的时域相加

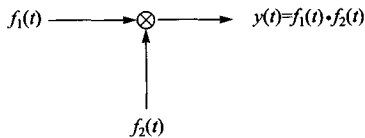


图 1-9 信号的时域相乘

如果 $f_1(t) = \sin \omega t$, $f_2(t) = \sin 8\omega t$, 那么 $f_1(t) + f_2(t)$ 如图 1-10 所示, $f_1(t) \cdot f_2(t)$ 的波形如图 1-11 所示。

1.3.2 信号的平移、反转与尺度变换

1. 信号的平移

信号的平移就是指 $f(t) \rightarrow f(t - \tau)$, 即将信号 $f(t)$ 沿 t 轴平移 τ 即得时移信号 $f(t - \tau)$, τ 为常数。其中, $\tau > 0$, 则右移 (滞后); $\tau < 0$, 则左移 (超前)。由于信号一般以时间 t 为自变量, 因此信号的平移亦称为时移。

若 $f(t)$ 的波形图如图 1-12 所示, 则 $f(t + 1)$ 的波形图如图 1-13 所示。

2. 信号的反转

信号的反转就是指 $f(t) \rightarrow f(-t)$ 。从波形看, 反转信号 $f(-t)$ 的波形相当于将 $f(t)$ 的波形



以 $t=0$ 为轴反转 180° 得到, 即以纵轴为轴折叠, $f(t)$ 和 $f(-t)$ 的波形相对于纵轴成镜像关系。

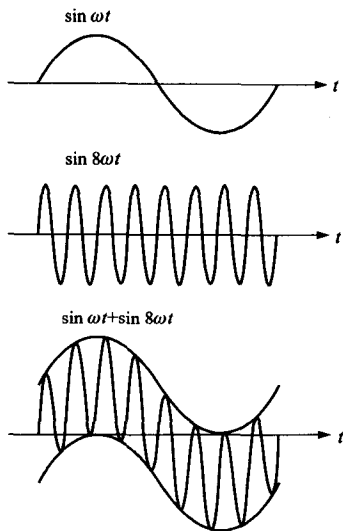


图 1-10 $f_1(t) + f_2(t)$ 示意图

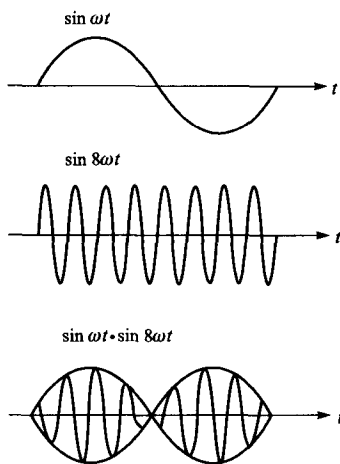


图 1-11 $f_1(t) \cdot f_2(t)$ 示意图

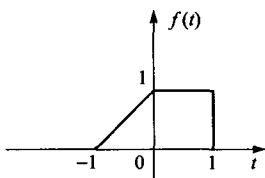


图 1-12 $f(t)$ 的波形图

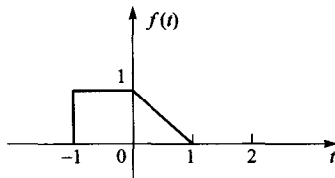


图 1-13 $f(t+1)$ 的波形图

若 $f(t)$ 的波形图如图 1-14 所示, 则 $f(-t)$ 的波形图如图 1-15 所示, 即以纵轴为轴折叠, 与 $f(t)$ 的波形成镜像关系。

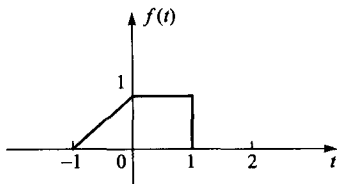


图 1-14 $f(t)$ 的波形图

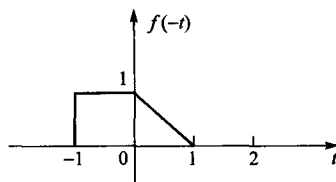


图 1-15 $f(-t)$ 的波形图

3. 尺度变换或信号的展缩

尺度的变换就是指 $f(t) \rightarrow f(at)$, 即波形发生压缩或扩展, 标度变换。



例如 $f(t)$ 如图 1-16 所示, 画出 $f(2t)$ 和 $f\left(\frac{t}{2}\right)$ 的波形, 如图 1-17 所示。

由图可知, 三个波形相似, 都是 t 的一次函数。但由于自变量 t 的系数不同, 则达到同样函数值 2 的时间不同。时间变量乘以一个系数等于改变观察时间的标度。其特性:

- (1) 时间尺度压缩: $t \rightarrow \frac{t}{2}$, 波形扩展。
- (2) 时间尺度增加: $t \rightarrow 2t$, 波形压缩。

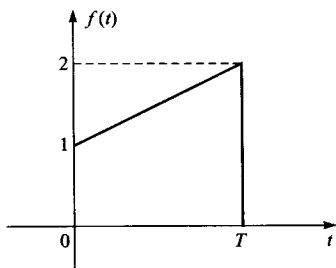


图 1-16 $f(t)$ 的波形图

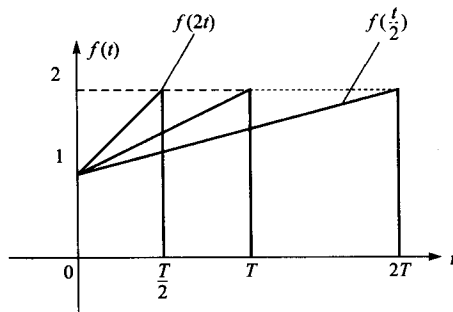


图 1-17 $f(2t)$ 和 $f\left(\frac{t}{2}\right)$ 的波形

结论: 如果将信号横坐标的尺寸展宽或压缩 (常称为尺度变换)。可用变量 at (a 为非零常数) 替代原信号 $f(t)$ 的自变量 t , 得到信号 $f(at)$, 即 $f(t) \rightarrow f(at)$, 则有

- (1) 若 $a > 1$, 则信号 $f(at)$ 是将原信号 $f(t)$ 以原点为基准沿横轴压缩到原来的 $1/a$ 。
- (2) 若 $0 < a < 1$, 则信号 $f(at)$ 表示将 $f(t)$ 沿横轴展宽至 $1/a$ 倍。
- (3) 若 $a < 0$, 则信号 $f(at)$ 表示将 $f(t)$ 的波形反转并压缩或展宽至 $1/|a|$ 。
- (4) 离散序列通常不做展缩运算, 这是因为 $f(an)$ 仅在 an 为整数时才有意义, 而当 $a > 1$ 或当 $a < 1$, 且 $a \neq 1/m$ (m 为整数) 时, 它常常丢失原序列 $f(n)$ 的部分信息。

4. 综合变换

对于 $f(t) \rightarrow f(-at \pm b) = f\left[-a\left(t \mp \frac{b}{a}\right)\right]$, 其转换步骤一般为:

- (1) 尺度变换: 若 $a > 1$, 则压缩到原来的 $1/a$; 若 $a < 1$, 则扩展 $1/a$ 倍。
- (2) 平移 (时移): 若为 “+”, 则左移 b/a 单位; 若为 “-”, 则右移 b/a 单位。

(3) 反转: $f(-at \pm b) = f\left[-a\left(t \mp \frac{b}{a}\right)\right]$ 。

例 1-1 已知 $f(t)$ 的波形, 求 $f(3t+5)$ 。



解：方法一，首先做尺度变换，将 $f(t)$ 的波形沿时间 t 轴压缩到原来的 $1/3$ 得到 $f(3t)$ 的波形；然后做平移，将 $f(3t)$ 的波形沿时间 t 轴向左平移 $5/3$ 个单位便可得到 $f(3t+5)$ 的波形。

方法二，首先做平移（时移），将 $f(t)$ 的波形沿时间 t 轴向左平移 5 个单位得到 $f(t+5)$ 的波形；然后做尺度变换，将 $f(t+5)$ 的波形沿时间 t 轴压缩到原来的 $1/3$ 得到 $f(3t+5)$ 的波形。

综合上述，其转换步骤如图 1-18 所示。

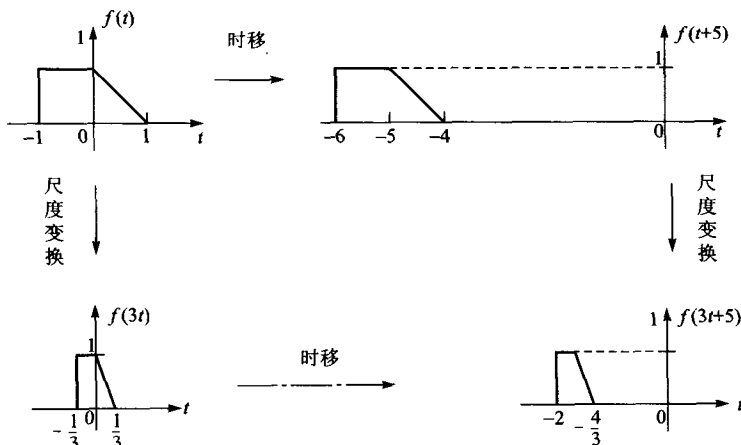


图 1-18 转换步骤图

1.3.3 信号的微分与积分

1. 信号的微分

信号 $f(t)$ 的微分表达式为 $f'(t) = \frac{df(t)}{dt}$ 。

例如，已知 $f(t)$ 的波形，则 $f'(t)$ 的波形图如图 1-19 所示。

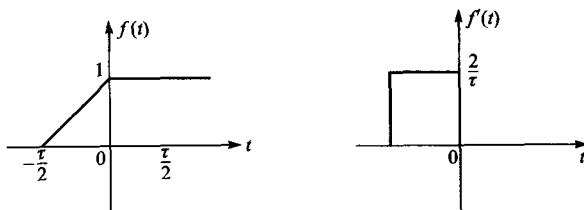


图 1-19 $f(t)$ 和 $f'(t)$ 的波形图

2. 信号的积分

信号 $f(t)$ 的积分表达式为 $\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$ 。例如，已知 $f(t)$ 的波形，则 $\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$ 的波形图如图 1-20 所示。