

高等院校电子信息工程类规划教材



信号与系统

基础 (MATLAB版)

石辛民 程晓东 郝整清 编著

清华大学出版社

信号与系统

基础 (MATLAB版)

石辛民 程晓东 郝整清 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分为8章,分别介绍了信号与系统的基本概念,连续时间系统的时域分析,傅里叶分析,连续时间信号与系统的S域分析,离散时间信号与系统的时域分析,离散时间信号和系统的Z域分析,数字信号处理基础以及系统的状态变量分析。

本书可作为电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、计算机技术以及生物医学工程等电气信息类专业本科生的“信号与系统”课程教材,也可供工程技术人员自学参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统基础: MATLAB版/石辛民,程晓东,郝整清编著.--北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-43731-4

I. ①信… II. ①石… ②程… ③郝… III. ①Matlab 软件—应用—信号系统—系统分析
IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第089172号

责任编辑:陈 明
封面设计:傅瑞学
责任校对:王淑云
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:19.75 字 数:478千字

版 次:2016年3月第1版 印 次:2016年3月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.00元

“信号与系统”课程是电子信息、通信工程、电气工程以及自动化等专业的一门主干专业基础课,也是相关专业研究生入学考试课程之一。进入到信息和智能化时代,无线通信、光通信、云计算、微电子、人工智能以及大数据处理等技术已经达到很高的水平,这些领域的理论和应用都渗透了信号与系统的相关知识。信号与系统理论阐述了电路系统的数学模型建立、求解方法,给出了电信号和系统在频率域的定义、描述方法,总结和拓展了人们对信号特性的认知,完善了关于频域的一整套理论和分析方法,为后续在信号处理领域进一步探索与应用打下了基础。同时,线性电路系统的分析理论和方法又可以应用到诸如生命科学、仿生材料、装备制造、空间科学、智能系统以及人类社会等领域的研究方面,是一套普适的方法论,具有开拓思路、启迪智慧的作用。

全书共分为8章。第1章信号与系统的基本概念,第2章连续时间系统的时域分析,第3章傅里叶分析,第4章连续时间信号与系统的S域分析,第5章离散时间信号与系统的时域分析,第6章离散时间信号与系统的Z域分析,第7章数字信号处理基础,第8章系统的状态变量分析。

本书结合编者多年教学实践,围绕新的教学改革对教学方式和教材内容的要求,编写时突出了以下特点:

(1) 内容简练易懂,强调概念,突出教学重点。结合对应用性、创新性本科生的要求,以信号与系统的基本概念、基本理论和分析方法为主,注重层次、循序渐进。

(2) 例题讲解丰富,举一反三,让学生在有限的时间内掌握较多的解题方法和技巧,为后续的习题求解提供了思路,对前面概念和理论内容也是一种更好的复习掌握。

(3) 将MATLAB解题方法与经典解题方法及内容讲解有机结合起来,运用现代的手段分析和描述信号与系统,通过简单实例介绍MATLAB基本语句与函数,让学生既学到了信号与系统的通用分析方法,又掌握了软件工具,学会快速分析及描绘信号曲线图的方法。

(4) 课后习题精心挑选、难易适度、内容较新、紧扣书中内容。除了经典内容的习题,增加了思考题和MATLAB习题。

本书由石辛民担任主编,负责拟定大纲、统稿并编写第8章和所有的MATLAB例题,程晓东编写了第1~4章,郝整清编写了第5~7章。

本书可作为电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、计算机技术以及生物医学工程等电气信息类专业本科生的“信号与系统”课程教材。

编者

2016年1月

第 1 章 信号与系统的基本概念	1
1.1 信号与系统	1
1.2 信号的分类及基本信号示例	2
1.2.1 信号的分类	2
1.2.2 常用基本信号示例	4
1.3 信号的运算	6
1.3.1 信号的移位、反褶	6
1.3.2 信号的尺度变换(信号的伸展、压缩)	8
1.3.3 信号的微分和积分	10
1.3.4 两信号相加或相乘	11
1.4 单位阶跃信号与冲激信号	12
1.4.1 单位斜变信号	13
1.4.2 单位阶跃信号	13
1.4.3 单位冲激信号	15
1.5 信号的分解	17
1.5.1 直流分量与交流分量	17
1.5.2 偶分量与奇分量	17
1.5.3 脉冲分量	17
1.5.4 实部分量与虚部分量	18
1.6 系统的概念及分析方法	18
1.6.1 系统模型概念	19
1.6.2 系统的分类	20
1.6.3 线性时不变系统(LTIS)	21
1.6.4 系统分析方法	23
本章小结	24
课后思考讨论题	24

习题 1	25
第 2 章 连续时间系统的时域分析	29
2.1 线性时不变系统微分方程的建立	29
2.1.1 物理系统的微分方程描述	29
2.1.2 电路系统的微分方程描述	30
2.2 求解微分方程的经典法(系统全响应)	31
2.2.1 求解的基本原理	31
2.2.2 零输入响应与零状态响应	36
2.3 冲激响应和阶跃响应	40
2.3.1 冲激响应	40
2.3.2 阶跃响应	42
2.4 应用 MATLAB 求解微分方程	43
2.4.1 求解析解的符号法	43
2.4.2 求数值解的方法	48
2.5 卷积	50
2.5.1 卷积的定义	51
2.5.2 卷积的图形法和公式法计算	51
2.5.3 卷积的性质	54
2.5.4 利用卷积求零状态响应	55
本章小结	56
课后思考讨论题	56
习题 2	57
第 3 章 傅里叶分析	62
3.1 周期信号的傅里叶级数分析	62
3.1.1 周期信号的三角级数表示	62
3.1.2 周期信号的指数函数表示	65
3.1.3 典型周期函数的频谱	66
3.2 非周期信号的频谱分析	68
3.2.1 傅里叶变换	69
3.2.2 傅里叶变换的性质	76

3.2.3	周期信号的傅里叶变换	83
3.2.4	时域取样和取样定理	86
3.3	傅里叶分析用于通信系统	90
3.3.1	利用系统函数 $H(\omega)$ 求系统的响应	90
3.3.2	调制与解调	93
3.3.3	信号无失真传输	96
3.3.4	理想低通滤波器	98
	本章小结	100
	课后思考讨论题	100
	习题 3	101
第 4 章	连续时间信号与系统的 S 域分析	106
4.1	拉普拉斯变换及其逆变换	106
4.1.1	拉氏变换的定义	106
4.1.2	拉氏变换的 MATLAB 实现	108
4.1.3	典型函数的拉氏变换	109
4.2	拉氏变换的基本性质	111
4.3	拉氏逆变换的计算方法	115
4.3.1	包含不同实数极点	116
4.3.2	包含共轭复数极点	117
4.3.3	存在重根极点	118
4.4	拉氏变换法求解微分方程	120
4.4.1	用拉氏变换法求解微分方程	120
4.4.2	电路的 S 域模型	123
4.5	系统函数 $H(s)$ 及其应用	124
4.5.1	系统函数 $H(s)$ 的概念	124
4.5.2	系统函数的零极点分布与时域特性的关系	126
4.5.3	系统函数的零极点分布与频域特性的关系	130
4.5.4	线性系统的稳定性	133
	本章小结	135
	课后思考讨论题	136
	习题 4	136

第 5 章 离散时间信号与系统的时域分析	142
5.1 离散时间信号与系统	142
5.1.1 离散时间信号	142
5.1.2 离散时间系统	149
5.2 常系数线性差分方程的求解	152
5.2.1 迭代法	152
5.2.2 时域经典法	153
5.2.3 双零法	157
5.2.4 MATLAB 求解	159
5.3 离散时间系统的单位样值响应	160
5.4 卷积和	164
5.4.1 图形法	164
5.4.2 对位相乘求和法	166
5.4.3 列表法	166
5.4.4 MATLAB 软件法	168
本章小结	169
课后思考讨论题	169
习题 5	170
第 6 章 离散时间信号与系统的 Z 域分析	174
6.1 Z 变换	174
6.1.1 Z 变换的定义	174
6.1.2 典型序列的 Z 变换	175
6.1.3 Z 变换的收敛域	176
6.2 Z 逆变换	179
6.2.1 部分分式展开法	179
6.2.2 应用 MATLAB 进行部分分式展开	182
6.2.3 幂级数展开法(长除法)	182
6.2.4 留数法(围线积分法)	183
6.3 Z 变换的基本性质	185
6.3.1 线性特性	185

6.3.2	位移特性(时移特性)·····	186
6.3.3	序列线性加权(Z域微分)·····	189
6.3.4	序列指数加权(Z域尺度变换)·····	189
6.3.5	初值与终值定理·····	190
6.3.6	卷积定理·····	191
6.4	离散系统的系统函数 $H(z)$ 及应用·····	192
6.4.1	单位样值响应与系统函数·····	192
6.4.2	系统函数的零极点分布对系统特性的影响·····	193
6.4.3	离散时间系统的频率响应特性·····	196
6.4.4	应用 MATLAB 进行 $H(z)$ 的零极点与系统特性计算·····	200
	本章小结·····	203
	课后思考讨论题·····	203
	习题 6·····	203
第 7 章	数字信号处理基础 ·····	208
7.1	离散傅里叶变换·····	208
7.1.1	傅里叶变换的几种形式·····	209
7.1.2	离散傅里叶级数(DFS)·····	211
7.1.3	离散傅里叶变换(DFT)·····	212
7.1.4	离散傅里叶变换的性质·····	214
7.1.5	离散傅里叶变换的应用·····	219
7.2	快速傅里叶变换(FFT)·····	223
7.2.1	直接计算 DFT 的问题及改进途径·····	223
7.2.2	FFT 算法·····	224
7.2.3	快速傅里叶变换的应用·····	231
7.3	模拟滤波器的设计·····	236
7.3.1	模拟滤波器的逼近·····	237
7.3.2	巴特沃斯低通滤波器的设计·····	238
7.3.3	切比雪夫 I 型滤波器的设计·····	240
7.4	数字滤波器的设计·····	243
7.4.1	IIR 数字滤波器的设计·····	244
7.4.2	FIR 数字滤波器的设计·····	252

本章小结·····	261
课后思考讨论题·····	261
习题 7·····	262
第 8 章 系统的状态变量分析·····	263
8.1 系统的状态变量和动态方程·····	263
8.1.1 信号通过系统的动态方程·····	264
8.1.2 动态方程的建立·····	264
8.1.3 描述系统的模型及其相互转换·····	272
8.2 动态方程的求解·····	276
8.2.1 动态方程的数值解·····	276
8.2.2 连续动态方程的拉氏变换法求解·····	278
8.2.3 离散动态方程的 Z 变换法求解·····	283
8.2.4 动态方程的迭代法求解·····	286
8.3 系统的可控制性和可观测性·····	290
8.3.1 系统的可控制性·····	291
8.3.2 系统的可观测性·····	292
本章小结·····	294
课后思考讨论题·····	294
习题 8·····	295
部分习题参考答案·····	297
参考文献·····	306

本章是全书的基础,概括地介绍了信号与系统的基本概念和基本理论。主要介绍信号的描述、分类、分解、基本运算和波形变换,详细阐述了常用的典型信号、奇异信号的概念和基本性质,重点介绍了冲激信号的定义和性质。同时也讲述了系统的分类以及系统模型的概念,介绍了线性时不变系统的性质。

1.1 信号与系统

信息(information)泛指人类社会传播的一切内容,在人类认识和改造自然界的过程中,始终离不开信息的获取、传播和存储。美国信息管理专家霍顿给信息下的定义是:“信息是为了满足用户决策的需求而经过加工处理的数据。”简单地说,信息是经过加工的数据,或者说,信息是数据处理的结果。

消息(message)是客观物质运动或主观思维活动状态的一种反映,可以通过语言、文字、图像和数据等不同形式进行具体描述。消息可分为离散消息和连续消息,如电报中的报文、电话中的声音、电视中的图像和雷达探测的目标距离等,都是消息。信息与消息比较起来,信息的概念表现得更宏观一些,消息的概念表现得更具体一些。

信号(signal)是指消息的表现形式,是带有信息的某种物理量,如电信号、光信号和声信号等。消息一般不能直接传送,必须借助于一定形式的信号才能进行各种处理和实现远距离传输。信息包含在消息中,信号是消息的表现形式,因此也可以说信号是信息的载体,信息是信号的内涵,常见的消息有声音、图像和编码等。电信号是应用最广泛的物理量,通常用电压、电流或电磁场等物理量来表示,也可以表示为以时间 t 为自变量的函数形式。

系统(system)泛指由一群相互关联的个体组成,根据预先编排好的规则工作,能完成个别元件无法单独完成的工作群体。在信号处理理论中,人们把能加工、变换数字信号的实体

称作系统,由于处理数字信号的系统在指定的时刻或时序对信号进行加工运算,所以这种系统被看作是离散时间的。系统也可以用基于时间的语言、表格、公式、波形等多种形式来描述。

在人类社会的发展过程中,信息的传递一直是一个非常重要的任务,从古代的号角、烽火台,到今天的卫星通信,人类历史的发展与通信的发展有着密切的联系。信号的传输与处理技术最早始于利用电磁波传输信息的无线电通信,以后技术逐步进步并发展成为现代的通信、自动控制以及计算机等学科领域。



图 1-1 通信过程原理图

如图 1-1 所示,消息经过特定的传感器转换成电信号,再经发射机发射,进行远距离的传输,到达接收端。接收端通过接收机接收到发射信号,然后转换成电信号,通过特定转换器,将电信号转换成原始的消息,传达到接收者,完成了整个通信过程。

在信号传输过程中,会遇到各种各样的系统,“信号与系统”课程的主要内容就是研究这些系统将对信号产生怎样的影响;满足某些需要的系统应该具有怎样的特性;为了达到某种目的,应该设计怎样的系统。这些工作对于通信和控制系统有着非常重要的意义。以上提到的系统并不局限于通信系统,“信号与系统”的研究对象不光是通信和控制系统,也可以是能用数学模型和微分方程表示的其他系统,本课程中的很多理论和方法,可用于对其他系统的研究。

1.2 信号的分类及基本信号示例

1.2.1 信号的分类

信号的分类方法有很多种,从不同的角度考虑有不同的分类方法。按照信号和自变量的特性,可分为确定性信号与随机信号、周期信号与非周期信号、连续时间信号与离散时间信号、因果信号与非因果信号等。描述信号的基本方法是写出它的数学表达式,它们都是时间的函数,函数的图像称为信号的波形。为便于讨论,本书中信号与函数两个名词通用。

1. 确定性信号与随机信号

按照信号随时间变化的确定性来划分,信号可分为确定性信号与随机信号,如图 1-2 所示。



图 1-2 随机信号与确定性信号的波形

确定性信号 对于指定的某一时刻,可确定相应的函数值,如 $f(t) = 2e^t$ 。

随机信号 不可预知的不确定性信号,如噪声。

2. 周期信号与非周期信号

周期信号 若信号 $f(t)$ 满足

$$f(t) = f(t + nT), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1)$$

则 $f(t)$ 为周期信号,满足式(1-1)的最小正数 T 值,称为信号的周期。

非周期信号 不具有重复性的信号,找不到满足式(1-1)的周期 T 值。

3. 连续时间信号与离散时间信号

按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。

连续时间信号 在讨论的时间范围内,除若干个不连续点之外,对于任意时间值都可以给出确定的函数值,如 $f(t) = A\sin\omega t$ 。连续时间信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的(只取某些规定值)。时间和幅值都为连续的信号,又称模拟信号。

离散时间信号 信号的取值在时间上是离散的,只在某些规定的时刻给出函数值,其他时间没有意义,如 $x(n) = \{2, 1, 3, 4, 0, -2\} (n = 1, 2, \dots, 6)$ 。若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,则称为数字信号。数字信号在离散时刻的函数取值只能为 0 或 1 二者之一,或为其他整数离散值。如图 1-3(a)所示为连续时间信号,图 1-3(b)所示为离散时间信号。

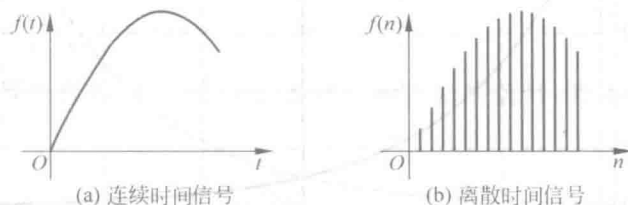


图 1-3 连续时间信号与离散时间信号

4. 因果信号与非因果信号

若信号 $f(t)$ 在 $t < 0$ 时为零, 即 $f(t) = 0 (t < 0)$, 则称该信号为因果信号, 或称为单边信号, 否则称为非因果信号。周期信号不是因果信号, 因为周期信号在 $t < 0$ 时取值不一定为零。

除以上划分方式之外, 还有将信号分为能量信号与功率信号, 调制信号、载波信号和已调信号等方式。

1.2.2 常用基本信号示例

1. 指数信号

指数信号的定义式为

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

式中 a 是实数, 当 $a > 0$ 时信号随时间而增长; 当 $a < 0$ 时信号随时间而衰减; 当 $a = 0$ 时信号不变, 即为直流信号。令 $\tau = 1/|a|$, τ 称为时间常数, τ 越大, 指数信号增长或衰减速率越慢。

在 MATLAB 指令窗中输入

```
>> ezplot 10 * exp(0.4 * t),
hold,
ezplot 10 * exp(-0.4 * t),
grid
```

回车得出的图 1-4, 即为指数信号。

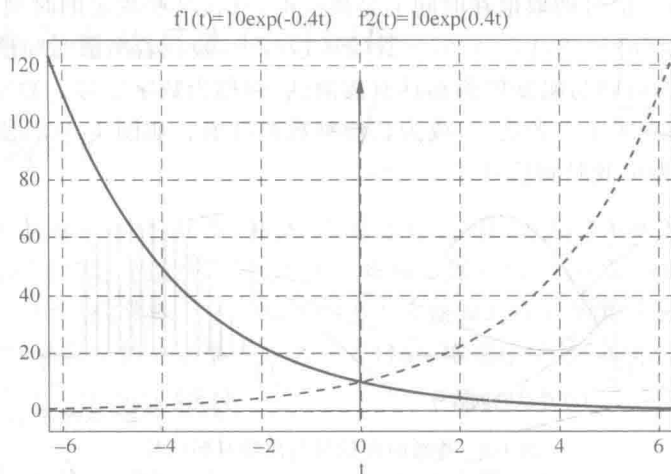


图 1-4 指数信号

2. 正弦信号

正弦信号和余弦信号之间仅仅相位相差 $\frac{\pi}{2}$, 故统称为正弦信号, 其表达式为

$$f(t) = K \sin(\omega t + \theta) \quad (1-3)$$

式中 K 为振幅, ω 为角频率, θ 为初相位。周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$, 其波形如图 1-5 所示。

3. 复指数信号

若指数信号的指数因子为复数, 则称为复指数信号, 其表达式为

$$f(t) = K e^{st} \quad (s = \sigma + j\omega)$$

借助欧拉公式, 常把正弦信号和余弦信号统一用复指数信号表示为

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

由此可得

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

所以复指数信号可以表示成

$$K e^{st} = K e^{\sigma t} [\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)]$$

此结果表明: 复指数信号可以分解为实部和虚部两部分, 其中实部只包含余弦信号, 虚部只包含正弦信号。式中的 σ 表征了正弦函数和余弦函数振幅随时间变化的情况:

若 $\sigma > 0$, 则正弦信号、余弦信号增幅震荡;

若 $\sigma < 0$, 则正弦信号、余弦信号衰减震荡;

若 $\sigma = 0$, 则正弦信号、余弦信号等幅震荡。

而当 $\omega = 0$ 时, s 为实数, 则复指数信号成为一般指数信号。

4. 抽样信号

在通信以及信号处理过程中, 经常会遇到一种重要的信号, 称为抽样信号 (sampling function), 其定义为

$$\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t} \quad (1-4)$$

在 MATLAB 指令窗中输入

```
>> ezplot('sin(t)/t', [-12 12 -0.3 1.2]), grid
```

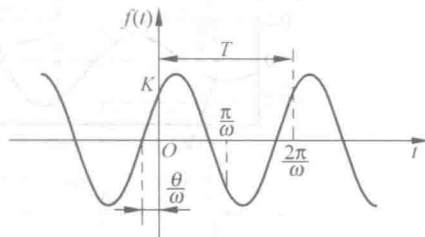


图 1-5 正弦信号

回车则得出该信号,如图 1-6 所示。

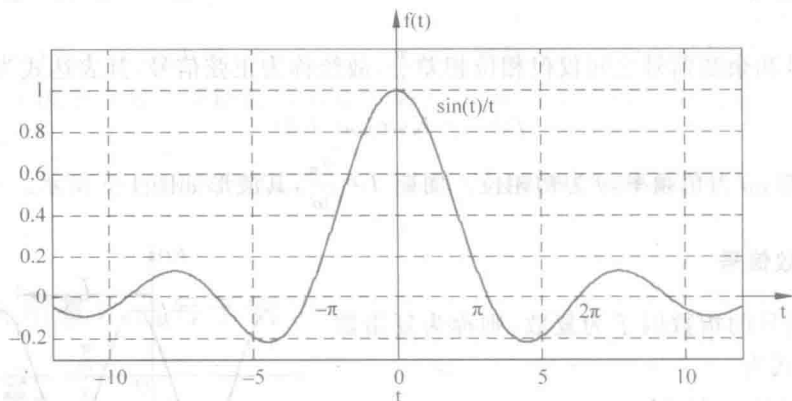


图 1-6 取样信号

抽样信号有以下性质和特点:

(1) $\text{Sa}(t)$ 函数是偶函数,它关于纵坐标轴对称,因为它是两个奇函数 $\frac{1}{t}$ 与 $\sin t$ 的乘积。

(2) 当 $t=0$ 时, $\text{Sa}(0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin t}{t} = 1$, 此时函数取得最大值。

(3) 当 $t = \pm\pi, \pm 2\pi, \dots, \pm n\pi$ 时, $\text{Sa}(t) = 0$, 曲线衰减震荡, 正负半轴第一个零点的横坐标分别为 $+\pi, -\pi$, 主瓣宽度为 2π 。

(4) $\int_0^{+\infty} \text{Sa}(t) dt = \frac{\pi}{2}, \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Sa}(t) dt = \pi$ 。

与 $\text{Sa}(t)$ 类似的还有 $\text{sinc}(t)$ 函数, 其定义式为 $\text{sinc}(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$ 。

1.3 信号的运算

信号的运算主要包括: 信号的移位(时移或延时)、反褶、尺度变换(伸展或压缩)、微分、积分以及两信号的相加或相乘等。

1.3.1 信号的移位、反褶

信号 $f(t)$ 的移位 若把 $f(t)$ 表达式中的自变量 t 更换为 $t+t_0, t_0>0$, 则信号变成 $f(t+t_0)$, 相当于 $f(t)$ 的波形在 t 轴上整体右移 t_0 ; 若将 $f(t)$ 表达式中的自变量 t 更换为 $t-t_0, t_0>0$, 则相当于 $f(t)$ 的波形在 t 轴上整体向左移 t_0 。