

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



信号与系统分析

高继森 主编

清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



信号与系统分析

高继森 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法。内容包括连续时间信号与系统的时域分析、频域分析及复频域分析,离散时间系统的时域分析及Z域分析,状态变量分析法,并附有信号与系统分析实验。配合正文,书中配有大量的例题和习题,并附有部分习题的答案。

本书可作为高等院校电信、电子、电气控制、自动化等电类专业基础课程的教材,也可供有关科技人员参考。

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

信号与系统分析/高继森主编. —北京:清华大学出版社,2012.10
(21世纪高等学校规划教材·电子信息)
ISBN 978-7-302-29358-3

I. ①信… II. ①高… III. ①信号分析—高等学校—教材 ②信号系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第156907号

责任编辑:郑寅莹 赵晓宁

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

责任印制:宋林

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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.5

字 数:437千字

版 次:2012年10月第1版

印 次:2012年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

编审委员会成员

东南大学	王志功	教授
南京大学	王新龙	教授
南京航空航天大学	王成华	教授
解放军理工大学	邓元庆	教授
	刘景夏	副教授
上海大学	方勇	教授
上海交通大学	朱杰	教授
	何晨	教授
华中科技大学	严国萍	教授
	朱定华	教授
华中师范大学	吴彦文	教授
武汉理工大学	刘复华	教授
	李中年	教授
宁波大学	蒋刚毅	教授
天津大学	王成山	教授
	郭维廉	教授
中国科学技术大学	王煦法	教授
	郭从良	教授
	徐佩霞	教授
苏州大学	赵鹤鸣	教授
山东大学	刘志军	教授
山东科技大学	郑永果	教授
东北师范大学	朱守正	教授
沈阳工业学院	张秉权	教授
长春大学	张丽英	教授
吉林大学	林君	教授
湖南大学	何怡刚	教授
长沙理工大学	曾喆昭	教授
华南理工大学	冯久超	教授



西南交通大学

重庆工学院

重庆通信学院

重庆大学

重庆邮电学院

西安电子科技大学

西北工业大学

集美大学

云南大学

东华大学

冯全源 教授

金炜东 教授

余成波 教授

曾凡鑫 教授

曾孝平 教授

谢显中 教授

张德民 教授

彭启琮 教授

樊昌信 教授

何明一 教授

迟 岩 教授

刘惟一 教授

方建安 教授

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail:weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

信号与系统分析是高等工科院校电信、电子、电气工程、自动控制、自动化等专业必修的技术基础先导课程,该课程的地位在大学本科4年的学习过程中是举足轻重的。该课程中所涉及的内容是学生学习后续专业课的基础。

本书的主要任务是介绍信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法,使学生掌握其基本概念和原理、基本分析方法,即信号与系统的时域分析法、频域分析法、复频域分析法、Z域分析、系统的状态变量分析法,以提高学生的分析思维能力和计算能力,为学习后续课程奠定良好的基础。

本书编写基本原则是立足于实事求是、夯实基础、精选内容、有利教学的指导思想,从授课的对象出发,考虑实际授课学时,兼顾课程自身广度与深度的关系,有针对性地为学​​生奠定好基础理论。本书的体系符合由浅入深、循序渐进的认识规律,采用信号—系统分析;时域—频域—复频域分析;连续—离散系统分析体系。编者认为,这样一种结构符合由浅入深、由简到繁、由静到动、由局部到整体的认识规律,便于引导学生逐步由浅入深,最终具备较完整的基础理论知识。书中配有较丰富的例题与习题,有助于学生对基本内容的理解和掌握。

本书由高继森、王玮和王芬琴合作编写。其中,第1、第2章及附录由高继森编写,第3和第4章由王玮编写,第5和第6章由王芬琴编写,高继森负责全书的组织及统稿工作,并任主编。在编写本书时,杨硕、贾安然、张雄、马子奕4位同志给予鼎力支持,在此一并表示感谢。

由于水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳切希望读者批评指正。

来信请寄:兰州交通大学电子信息工程学院 邮编 730070

编者
2012.4

目 录

第 1 章 连续时间信号与系统的时域分析	1
1.1 信号的定义与分类	1
1.2 信号的描绘与运算	5
1.2.1 一些基本信号及性质.....	5
1.2.2 信号的运算	13
1.3 系统及其分类.....	19
1.3.1 系统的概念	19
1.3.2 系统的分类	19
1.4 P 算子与零输入响应.....	23
1.4.1 P 算子与其运算规则	23
1.4.2 由微分方程组求任一待求量的方程	25
1.4.3 系统的零输入响应	26
1.5 系统的单位阶跃与单位冲激响应.....	28
1.5.1 系统输入信号与输出响应之间的关系	28
1.5.2 系统的单位阶跃响应	29
1.5.3 系统的单位冲激响应	32
1.6 系统的零状态响应——卷积积分.....	36
1.6.1 求系统零状态响应的卷积积分公式	36
1.6.2 卷积的图解法	39
1.6.3 卷积的解析法	42
1.6.4 系统的全响应	44
1.6.5 卷积积分的运算规则与性质	47
习题 1	52
第 2 章 连续时间系统的频域分析	58
2.1 周期信号的频谱分析——傅里叶级数.....	58
2.1.1 三角形式的傅里叶级数	59
2.1.2 周期信号的对称情况	62
2.1.3 傅里叶级数的指数形式	65
2.1.4 周期信号的频谱	66
2.1.5 求傅里叶级数系数的简便方法	68
2.2 周期非正弦信号作用下电路的稳态分析.....	72

2.3	周期非正弦信号的有效值和功率	74
2.4	非周期性信号的频谱——傅里叶变换	78
2.5	典型非周期信号的频谱	80
2.5.1	单边指数信号	80
2.5.2	双边指数信号	81
2.5.3	单位冲激信号	82
2.5.4	冲激函数的导数	82
2.5.5	直流信号	82
2.5.6	矩形脉冲信号	83
2.5.7	单位阶跃信号	84
2.5.8	符号函数	85
2.6	傅里叶变换的性质	87
2.6.1	线性特性	87
2.6.2	奇偶性	87
2.6.3	时移特性	89
2.6.4	频移特性	90
2.6.5	对称性	91
2.6.6	尺度变换特性	92
2.6.7	时域卷积	94
2.6.8	频域卷积	95
2.6.9	微分特性	96
2.6.10	时域积分	98
2.6.11	频域微分	100
2.6.12	频域积分	100
2.7	周期信号的傅里叶变换	101
2.7.1	正弦和余弦信号的傅里叶变换	102
2.7.2	单位冲激序列的傅里叶变换	102
2.7.3	一般周期信号的傅里叶变换	103
2.8	调制与解调原理	104
2.9	功率谱和能量谱	107
2.9.1	能量信号和功率信号	107
2.9.2	功率频谱	108
2.9.3	能量频谱	108
2.10	非周期信号作用下系统的频域分析	110
2.10.1	频域分析法	110
2.10.2	无失真传输的条件	111
2.10.3	理想低通滤波器	112
	习题 2	113

第 3 章 连续时间系统的复频域分析	119
3.1 拉普拉斯变换	119
3.1.1 拉普拉斯变换的定义	119
3.1.2 拉普拉斯变换的收敛域	120
3.1.3 常用信号的拉普拉斯变换	121
3.2 拉普拉斯变换的性质	123
3.3 拉普拉斯反变换	132
3.4 系统的复频域分析	137
3.4.1 微分方程的变换解	137
3.4.2 系统的 s 域分析	138
3.4.3 系统函数和零状态响应的 s 域分析	141
3.5 拉普拉斯变换和傅里叶变换的关系	144
3.6 传输函数的零、极点分析	146
3.6.1 根据系统零、极点的分布判断系统的稳定性	147
3.6.2 传输函数的零极点与频率响应特性	149
习题 3	154
第 4 章 离散时间信号与系统的时域分析	161
4.1 离散时间信号	161
4.1.1 离散时间信号的描述	161
4.1.2 基本离散信号	162
4.2 连续时间信号的离散化	166
4.2.1 抽样信号及其频谱	166
4.2.2 抽样定理	168
4.2.3 时分复用	170
4.3 离散时间系统的描述	171
4.3.1 离散信号的基本运算	171
4.3.2 离散时间系统	174
4.3.3 离散时间系统数字模型的建立	174
4.4 常系数线性差分方程的经典解法	178
4.4.1 差分方程的齐次解	179
4.4.2 差分方程的特解	181
4.5 零输入响应与零状态响应	183
4.5.1 离散系统的传输算子	183
4.5.2 零输入响应	184
4.5.3 零状态响应	187
习题 4	194

第 5 章 离散时间系统的 Z 域分析	199
5.1 Z 变换的定义及其收敛域	199
5.1.1 Z 变换的定义	199
5.1.2 Z 变换的收敛域	201
5.2 基本序列的 Z 变换	204
5.2.1 单位样值信号	204
5.2.2 单位阶跃序列	204
5.2.3 单边指数序列 $f(n)=r^n u(n)$	204
5.2.4 单边正弦序列和单边余弦序列	204
5.2.5 斜变序列 $f(n)=nu(n)$	205
5.3 Z 变换的性质	205
5.3.1 线性特性	206
5.3.2 左移位特性	206
5.3.3 右位移性质	207
5.3.4 标度变换特性	207
5.3.5 序列乘以 n	207
5.3.6 初值定理和终值定理	208
5.3.7 时域卷积定理	209
5.3.8 部分和	209
5.4 逆 Z 变换	210
5.4.1 幂级数展开法(长除法)	210
5.4.2 部分分式展开法	210
5.4.3 回线积分法(留数法)	214
5.5 离散时间系统的 Z 域分析法	216
5.6 系统函数 $H(z)$	223
5.6.1 $H(z)$ 的定义	223
5.6.2 S 域与 Z 域的关系	224
5.6.3 系统的稳定性	225
5.6.4 系统的频率响应	225
5.7 数字滤波器的基本概念	226
5.7.1 数字滤波器的原理	227
5.7.2 数字滤波器的设计	228
习题 5	231
第 6 章 系统的状态变量分析法	235
6.1 状态与状态变量	235
6.2 状态方程的建立	237
6.2.1 系统状态方程的直观编写	237

6.2.2 利用微分方程编写系统的状态方程——间接编写·····	239
6.3 状态空间的概念·····	241
6.4 状态方程的求解·····	243
习题 6·····	247
部分习题答案·····	250
附录 A 信号与系统分析实验·····	260
实验一 非正弦电路的研究·····	260
实验二 抽样定理·····	262
参考文献·····	266

第 1 章

连续时间信号与系统的 时域分析

随着现代科学技术的进步与发展,特别是高集成度与高速数字技术的飞跃发展,信息高速公路的建设,新材料、新工艺和新器件的不断出现,各技术学科领域和现代化工业的面貌发生了深刻和巨大的变化。当今科技革命的特征是以信息技术为核心,促使社会进入信息时代,使信号与系统日益复杂,也促进了信号与系统理论研究的发展。

系统理论主要研究两类问题,即分析与综合。系统分析是对给定的某具体系统,求出它对于给定激励的响应;系统综合则是在给定输入(激励)的条件下,为获得预期的输出(响应)去设计具体的系统。

本书讨论的范畴仅限于信号与非时变线性系统的分析。

1.1 信号的定义与分类

人类在社会活动和日常生活中,无时无刻不涉及信息的获取、存储、传输与再现。可以说上至天文,下至地理;大到宇宙,小到粒子、核子的研究,乃至工业生产、社会发展及家庭生活都离不开信息科学,故信息对每个人都赋予了特别重要的意义。“信息化”成为现代生活的特征。作为信息的表现形式和运载工具的信号也越来越复杂,对它的研究也越来越重要。

信息是反映人们得到“消息”,即原来不知道的知识,信息是人们认识客观世界的知识源泉。获取信息、传输信息和交换信息,自古至今一直是人类基本的社会活动。从公元前 700 余年,祖先利用烽火传递警报,到现代的电话、电报、传真、无线广播与电视,其目的都是要把某些“消息(message)”借一定形式的信号从一个地方传递到另一个地方,给对方以信息(information)。即信息要用某种物理方式表达出来,通常可以用语言、文字、图画、数据、符号等来表达。也就是说,信息通常隐含于一些按一定规则组织起来的约定的“符号”之中,这种约定方式组成的“符号”统称为消息。因此,消息中通常包含大量的信息。但是,信息一般都不能直接传送,它必须借助于一定形式的信号(光信号、声信号、电信号等),才能远距离快速传输和进行各种处理。因此,可以说信号是消息的载体,是消息的一种表现形式。

广义地说,信号是带有信息的随时间变化的物理量或物理现象。例如,机械振动产生力信号、位移信号及噪声信号;雷电过程产生的声、光信号;大脑、心脏运动分别产生脑电和心电信号;电气系统随参数变化产生电磁信号等。在通信技术中,信号是消息的表现形式,它

是传送各种消息的工具,是通信传输的客观对象。

目前由于电信号具有易于传输和可与其他信号相互转换的特点,得到了迅速的发展。电信号是指带有一定信息量,随时间而变化的电流或电压,电容器上的电荷、电感线圈的磁

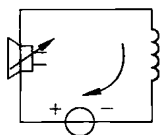


图 1-1-1 炭粒话筒电路

通及空间的电磁波等。本教材主要研究随时间变化的电流或电压信号。

下面举例说明电流或电压是怎样携带信息量的。图 1-1-1 是一炭粒话筒电路。轻重不同的声音作用在话筒中的炭粒电阻上,炭粒电阻值的大小将随声音而变化,变化的阻值控制着电路中电流的强弱,也就是说电流变化的规律是与语言信息相对应的。这种电流就是一种电信号,通过电感线圈可以把这种变化的电信号传送出去并进行放大,在接收端还可以还原为相同的语音。研究电信号的目的在于了解各种电信号的组成及其变化规律,以便按照人的意志产生、传输和恢复信号或进一步了解信号所携带的信息。下面从信号的分类中指出要研究的电信号的类型。

信号的分类方法很多,可以从不同的角度对信号进行分类。在信号与系统分析中,常以信号所具有的时间函数特性来加以分类。这样,信号可以分为确定信号与随机信号(图 1-1-2)、连续时间信号与离散时间信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号、实信号与复信号等。

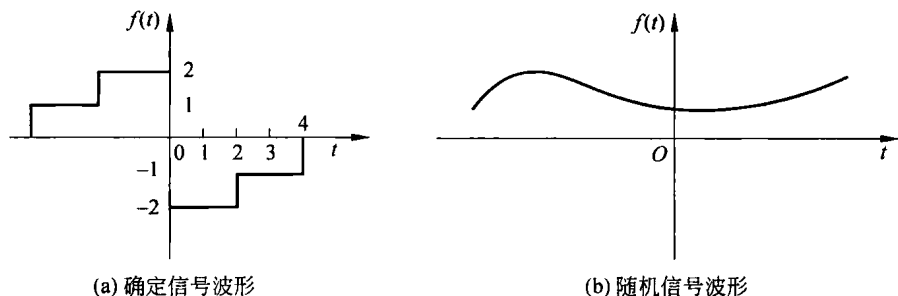


图 1-1-2 确定信号与随机信号的波形

1. 确定信号与随机信号

按时间函数的确定性划分,信号可分为确定信号与随机信号两类。

确定信号(determinatesignal)是指一个可以用明确的数学关系式描述的信号,即可以表示为一个或几个自变量的确定的时间函数的信号。也就是预先知道它的变化规律,是时间的确定函数,即在给定的某一时刻,信号有确定的值,如正弦信号、周期脉冲信号等。随机信号(random signal)则与之不同,不能预知它随时间变化的规律,是时间的确定函数,即不能用数学关系式描述,其幅值、相位变化是不可预知的,通常只知道它取某一些数值的概率,如噪声信号、汽车奔驰时所产生的振动信号等,但是在一段时间内由于它的变化规律比较确定,可以近似为确定信号。因此,为了分析方便,首先研究确定信号,在此基础上,根据随机信号的统计规律再研究随机信号。本书主要研究确定信号。

对于确定信号,它可以进一步分为周期信号、非周期信号与准周期信号。

周期信号(periodic signal)是指经过一定时间可以重复出现的信号,其表达式为

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1.1)$$

满足此关系式的最小 T 值称为信号的周期。这种信号,只要给出任一周期内的变化规律,即可确定它在所有其他时间内的规律性。

非周期信号(aperiodic signal)在时间上不具有周而复始的特性,往往具有瞬变性,也可以看做一个周期 T 趋于无穷大时的周期信号。

准周期信号是周期与非周期的边缘情况,由有限个周期信号合成,但各周期信号的频率相互不是公倍数的关系,其合成信号不满足周期信号的条件。这种信号往往出现于通信领域。例如,

$$f(t) = \cos t + \cos \sqrt{2}t$$

就是这种准周期信号。

2. 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,可将信号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。

连续信号(continuous signal)是指在所讨论的时间间隔内,除若干个第一类间断点,对于任意时刻值都可以给出确定的函数值。此类信号称为连续信号或模拟信号,通常用 $f(t)$ 表示,如图 1-1-3 所示。

离散信号(discrete signal)是指在所讨论的时间区间不连续规定的时刻给出函数值,而在其他时刻没有给出函数。通常用 $f(t_k)$ 或 $f(nT)$ [简写为 $f(n)$] 表示。由于它是由一组按时间顺序的观测值所组成,因此也称为时间序列或简称序列,如图 1-1-4 所示。离散信号又可分为两种情况:时间离散而幅值连续时,称为采样信号;时间离散而幅值量化时,则称为数字信号。

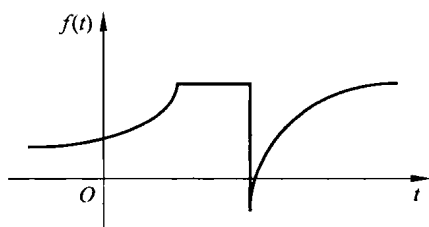


图 1-1-3 连续信号

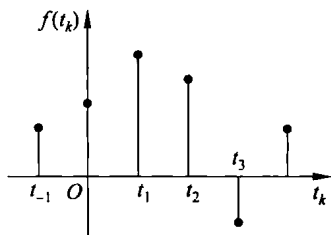


图 1-1-4 离散信号

3. 能量信号与功率信号

信号按时间函数的可积性划分,可以分为能量信号、功率信号和非功率非能量信号。信号可以看做是随时间变化的电压或电流,将其加到一电阻上的能量,简称为信号能量 E ,即

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.1.2)$$

其平均功率定义为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.1.3)$$

若信号 $f(t)$ 的能量有界,即 $0 < E < \infty$, 此时 $P = 0$, 则称此信号为能量有限信号,简称能量信号(energy signal)。

若信号 $f(t)$ 的功率有界, 即 $0 < P < \infty$, 此时 $E = 0$, 则称此信号为功率有限信号, 简称功率信号(power signal)。

值得注意的是, 一个信号不可能同时既是功率信号又是能量信号, 但可以是一个既非功率信号又非能量信号, 如单位斜坡信号就是一个例子。一般来说, 周期信号都是功率信号; 非周期信号则可能有 3 种情况, 即能量信号、功率信号、非能量非功率信号。例如, 持续时间有限的非周期信号为能量信号, 如图 1-1-5(a) 所示; 持续时间无限、幅度有限的非周期信号为功率信号, 如图 1-1-5(b) 所示; 持续时间、幅度均无限的非周期信号为非功率非能量信号, 如图 1-1-5(c) 所示。

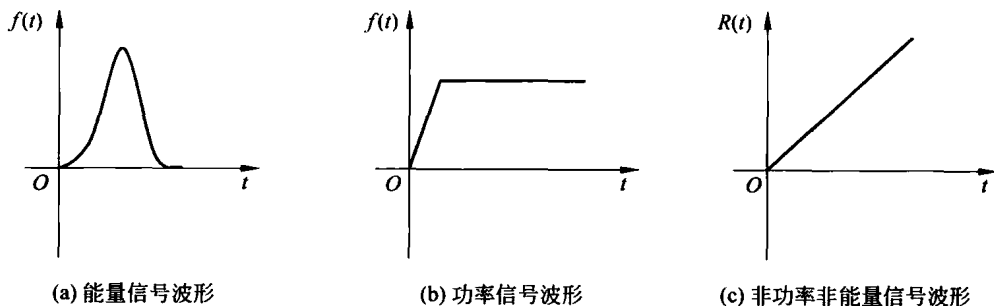


图 1-1-5 3 种非周期信号

例 1.1.1 如图 1-1-6 所示信号, 判断其是否为能量信号与功率信号。

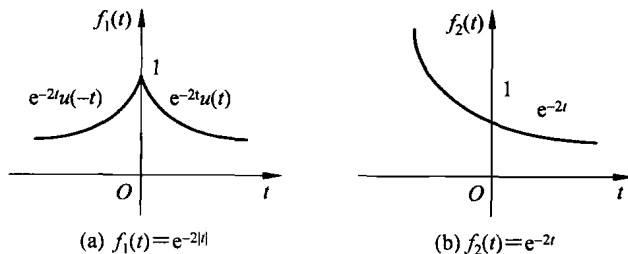


图 1-1-6 例 1.1.1 用图

【解】 图 1-1-6(a) 所示的信号 $f_1(t) = e^{-2|t|}$

$$\begin{aligned} E &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T (e^{-2|t|})^2 dt \\ &= \int_{-\infty}^0 e^{4t} dt + \int_0^{\infty} e^{-4t} dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-4t} dt = \frac{1}{2} \\ P &= 0 \end{aligned}$$

因此该信号为能量信号。

对于图 1-1-6(b) 所示信号 $f_2(t) = e^{-2t}$, 则有

$$\begin{aligned} E &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T (e^{-2t})^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[-\frac{e^{-4T} - e^{4T}}{4} \right] = \infty \\ P &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E}{2T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{4T} - e^{-4T}}{8T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{4T}}{8T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{4T}}{2} = \infty \end{aligned}$$

所以该信号既非能量信号又非功率信号。由此可见, 按能量信号与功率信号分类时, 从理论