



高等院校电子信息与电气学科特色教材

信号与系统

周建华 游佰强 编著

清华大学出版社



高等院校电子信息与电气学科特色教材

信号与系统

周建华 游佰强 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以连续时间信号与系统和离散时间信号与系统两条主线,采用类比、循序渐进的方式,分别从时域、频域、复频域分析,以及状态变量分析等几大主题,系统论述了确定性信号经线性时不变系统传输和处理的基本概念及各类分析方法,重点突出了电子信息、通信和控制工程应用背景内涵,并列举了一系列实例分析和最新研究应用进展。

全书共分9章,主要内容包括信号与系统的基本概念、连续与离散系统的时域分析、拉普拉斯变换与连续系统的 s 域分析、 Z 变换与离散系统的 z 域分析、傅里叶级数和变换与信号的频域分析、系统的频域分析及其应用主题、连续与离散系统的状态变量分析。

本书既可作为高等院校电子信息类及相关学科信号与系统课程的教材或参考书,也可供相关科研与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/周建华,游佰强编著. —北京:清华大学出版社,2009.6

(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-19304-3

I. 信… II. ①周… ②游… 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(2009)第008774号

责任编辑:陈国新

责任校对:时翠兰

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

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 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.5 字 数:606千字

版 次:2009年6月第1版 印 次:2009年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:36.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:021488-01

教师反馈表

感谢您购买本书！清华大学出版社计算机与信息分社专心致力于为广大院校电子信息类及相关专业师生提供优质的教学用书及辅助教学资源。

我们十分重视对广大教师的服务，如果您确认将本书作为指定教材，请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址，我们将免费向您提供有关本书的其他教学资源。

您需要教辅的教材：	信号与系统(周建华)		
您的姓名：			
院系：			
院/校：			
您所教的课程名称：			
学生人数/所在年级：	_____人/ 1 2 3 4 硕士 博士		
学时/学期	_____学时/_____学期		
您目前采用的教材：	作者：_____ 书名：_____ 出版社：_____		
您准备何时用此书授课：			
通信地址：			
邮政编码：		联系电话	
E-mail：			
您对本书的意见/建议：		系主任签字	
		盖章	

我们的联系地址：

清华大学出版社 学研大厦 A602, A604 室

邮编：100084

Tel: 010-62770175-4409, 3208

Fax: 010-62770278

E-mail: liuli@tup.tsinghua.edu.cn; hanbh@tup.tsinghua.edu.cn

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成

为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人: 陈志辉 chenzhihui@tup.tsinghua.edu.cn

前言

信号与系统是电类和信息类专业的重要技术核心课程和许多院校的考研科目,也是电子、通信学术领域发展的必备基础知识。目前已有众多国内外著名高校的学者参与此课程的教学,并相继编著出版了亮点纷呈的教材和辅助参考书籍。例如在国内,对该课程教学最有影响力之一的教材当属由清华大学郑君里教授等所编撰的《信号与系统》上、下两册和一些教辅书,特别是刚推出的《教与写的记忆——信号与系统评注》,溶入了其丰富的教学履历和清晰的教材编写思路;而在国外,得到广泛关注的则有美国麻省理工学院(MIT)A. V. Oppenheim教授等编撰的“Signals & Systems”,以及加州大学伯克利分校(UCB)Edward Lee教授等编撰的“Structure and Interpretation of Signals & Systems”,分别以灵活多变的实例和反映当代数字世界的真实性模型而著称。

作者经过多年的信号与系统本科课程教学工作,并在国内外相关的众多优秀书籍熏陶下,逐渐形成了自己对课程相关内容的独特理解,并从电子信息类工科学生的核心需求出发编写了此书。本书基于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统两条主线,以类比和循序渐进的方式分别从时域、频域、复频域以及状态变量等几大分析主题展开详尽论述。全书既注重基本概念、求解方法和分析手段的阐述,也注意结合在实际系统中的应用,配合课程软件和硬件实验,使学生重点掌握有关信号与系统分析的主要思路 and 具体处理方法,全面了解相关的实际应用领域及其发展状况,为学生在电子科学与技术、通信工程和信号处理等学科领域的进一步学习和研究打下坚实的基础。

本书具有如下特色:

- (1) 结构设计独特,类比性强。
- (2) 主题集中,内容精练,避免过多重复先修知识或后续知识。
- (3) 每章后的小结和学习要点有助于及时复习。
- (4) 考虑到题解参考书繁多,所以仅以适量精华的思考题和习题来激发学生的学习兴趣 and 巩固所学知识。
- (5) 突出物理图像的分析 and 解题思路的阐述,简化繁琐的数学推导过程。
- (6) 重视理论在实际工程技术中的应用及指导意义。
- (7) 附录、索引等与国际接轨,方便读者。
- (8) 内容通俗易懂,解说详尽,大部分习题均给出了答案,便于自学。
- (9) 配有多媒体电子教案,有博雅教学网站支持(<http://boya.xmu.edu.cn>)。

本书的编写以明确集中的主题、精心提炼的内容,以及充分类比的安排和分析方式使其具有鲜明的特色,适应高等院校当前积极开展的教学改革,特别是课时压缩和三学期制的实施。它可作为电子信息类和通信工程类本科生 45~60 学时课程的教材,也可选为教师 and 学生的案头参考书,只要读者具有一定的微积分基础、复数运算操练,并初步了解微分方程及电路分析知识,就可以着手研修。本书在基本概念、求解方法和分析手段的阐述方面也做了仔细推敲,注重各类问题的合理搭配、数学工具的灵活运用和实际系统的变化应用,使读者在生动有趣、启发性的探索实践过程中主动地学习,将所学知识真正转变为自身的学识。在绪论部分除了总体概述连续和离散时间信号与系统两条主线外,还专门针对目前流行的软件实验工具和经典实例进行了简单介绍。而主体内容围绕两条主线展开,涵盖了时域分析、变换域分析和状态方程分析等几大核心模块。每章后均配有小结和学习要点,以及适量精选的习题,并在书末给出了大部分习题的简明参考答案。

全书共分 9 章。第 1 章分别针对连续时间与离散时间的信号和系统,总体介绍了基本概念、数学模型、典型信号和系统、信号的常用运算和系统的线性时不变性等。第 2 章围绕连续时间系统及其微分方程的时域分析,分别从数学分解和物理分解阐述了在时域中由激励求解系统响应的具体方法,引出自由响应与强迫响应、零输入响应与零状态响应、冲激响应与阶跃响应,以及固有频率等重要概念,并给出采用冲激匹配法确定初始条件和利用卷积积分法求零状态响应的详细过程。第 3 章则围绕离散时间系统及其差分方程的时域分析,以类比于第 2 章的方式来讨论具体求解方法和相关的重要概念,并给出采用迭代法确定初始条件和利用卷积和法求零状态响应的详细过程。第 4 章围绕连续时间系统的 s 域分析,在介绍拉普拉斯变换及其性质的基础上,重点讨论在复频率 s 域中由激励求解系统响应的具体方法,以及利用系统函数及其零点、极点分布对系统的稳定性和因果性等的分析。第 5 章则围绕离散时间系统的 z 域分析,以类比于第 2 章的方式来讨论在指数复频率 z 域中由激励求解系统响应的具体方法,以及系统函数和系统性能的分析。第 6 章分别针对周期连续信号、非周期连续信号及离散信号,介绍灵活运用傅里叶级数和傅里叶变换及其性质进行信号频谱特性分析的方法,以及幅度频谱和相位频谱图形的绘制。第 7 章则主要基于系统的系统函数,阐述在频域中求响应的方法,并引出无失真传输、理想低通滤波器、系统的可实现性、调制与解调和抽样等重要概念,以及它们在通信系统中的实际应用。最后两章有别于前几章中只关注输入、输出的经典系统分析手段,转为同时关注系统内部性能的现代系统分析手段,以类比的形式分别针对连续时间系统和离散时间系统的状态变量分析,给出信号流程图、状态变量等基本概念,重点介绍系统状态方程的建立及其时域和复频域的求解过程,并讨论依据状态方程的各系数矩阵对系统的重要特性的分析。

在书籍编写过程中得到了许多同事、学生和朋友们帮助,很多灵感和想法来源于与他(她)们的交流。这里要特别感谢电子工程系的游佰强教授,他对全文的仔细校阅和提出的精辟观点为本书内容增色不少,很多图形的绘制也得到了他的大力协助;通信工程系的黄莲芬高工在教学内容上的建设性意见对本书的组织构成有极大帮助;刘慧老师在课程助教工作中投入的辛勤劳动和提出的独特见解也为本书内容的丰富、完善添砖加瓦。这里对她们表示衷心的感谢。还要感谢研究生俞斌、林伟峰、罗勇和林斌等在担任教学助理期间所做的认真工作和提出的有益观点,罗勇和林斌还为一些章节提供了丰富的实例和图表。另外,通过与厦门大学 8 届本科生的课程教学互动交流,也使本人获益匪浅;特别是 06 级电子班

学生首次采用此书的试用版作为教材,并耐心而细致地帮助更正了很多错误,提出许多宝贵意见,在此要向他(她)们表达诚挚的谢意。

厦门大学信息科学与技术学院为本人提供了良好的工作环境和坚实的学术支持,对此表示深深的谢意。

最后,我要将这本处女作献给我的家人,没有你们的默默支持和无私奉献,我是无法完成此书的。下面谨以两句古语与大家共勉:

知之者不如好之者,好之者不如乐之者。(《论语·雍也》)

博学之,审问之,慎思之,明辨之,笃行之。(《礼记·中庸》)

周建华

2008年8月8日

厦门大学

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 连续时间信号	1
1.1.1 连续信号的数学模型与基本运算	3
1.1.2 典型的常用连续信号	9
1.2 离散时间信号	16
1.2.1 离散信号的数学模型与基本运算	18
1.2.2 典型的常用离散序列	22
1.3 连续时间系统	27
1.3.1 实际系统的数学模型	27
1.3.2 典型的连续时间系统	28
1.3.3 连续系统的线性时不变性	32
1.4 离散时间系统	36
1.4.1 离散系统的数学模型	36
1.4.2 典型的离散时间系统	36
1.4.3 离散系统的线性时不变性	39
1.5 LTI 系统的分析方法和重要工具	41
1.6 小结和学习要点	43
习题	45
第 2 章 连续时间 LTI 系统的时域分析	49
2.1 系统时域模型的建立	49
2.2 自由响应与强迫响应	52
2.3 零输入响应与零状态响应	56
2.4 冲激响应与阶跃响应	58
2.5 卷积法	60
2.6 小结和学习要点	65
习题	66
第 3 章 离散线性时不变系统的时域分析	73
3.1 系统时域模型的建立	73
3.2 自由响应与强迫响应	76
3.3 零输入响应与零状态响应	78



3.4	冲激响应与阶跃响应	80
3.5	卷积和与反卷积和	82
3.5.1	卷积和与零状态响应的求解	82
3.5.2	反卷积和及其应用	91
3.6	小结和学习要点	92
	习题	93
第4章	连续时间 LTI 系统的 s 域分析	100
4.1	拉普拉斯变换与逆变换	100
4.1.1	单边拉普拉斯变换	100
4.1.2	双边拉普拉斯变换	108
4.1.3	拉氏逆变换	110
4.2	拉氏变换求解法	115
4.2.1	微分方程的求解	115
4.2.2	电路的 s 域分析法	116
4.3	系统函数及 s 平面分析	119
4.3.1	时域特性与频响特性的分析	120
4.3.2	频响特性的 s 平面分析	130
4.4	连续系统的因果性与稳定性分析	135
4.5	小结和学习要点	140
	习题	141
第5章	离散时间 LTI 系统的 z 域分析	152
5.1	Z 变换与逆变换	152
5.1.1	Z 变换方法	152
5.1.2	Z 变换与拉氏变换的关系	162
5.1.3	逆 Z 变换方法	165
5.2	Z 变换求解法	169
5.2.1	差分方程的 Z 变换求解法	169
5.2.2	模拟方框图的 z 域分析法	170
5.3	系统函数及 z 平面分析	172
5.3.1	系统函数	172
5.3.2	时域特性与频响特性	172
5.3.3	频响特性的 z 平面分析	182
5.4	离散系统的因果性与稳定性分析	184
5.5	小结和学习要点	187
	习题	188

第 6 章 信号的频域分析	194
6.1 周期信号的傅里叶级数与频谱图	194
6.1.1 三角函数形式的傅里叶级数展开	194
6.1.2 指数形式的傅里叶级数展开	195
6.1.3 周期信号的功率特性	197
6.1.4 特殊信号的傅里叶级数展开	200
6.1.5 傅里叶级数的有限展开及其误差分析	205
6.1.6 典型信号的傅里叶级数展开	207
6.2 连续时间信号的傅里叶变换与频谱	210
6.2.1 傅里叶变换方法	210
6.2.2 典型非周期信号的傅里叶变换	213
6.2.3 傅里叶变换的基本性质	221
6.2.4 周期信号的傅里叶变换	231
6.3 离散时间信号的傅里叶变换	234
6.4 信号的能量和功率密度谱	239
6.5 小结和学习要点	241
习题	242
第 7 章 线性系统的频域分析	249
7.1 线性系统的频域响应求解	249
7.2 无失真传输与理想滤波器	252
7.2.1 线性系统的无失真传输	252
7.2.2 理想低通滤波器	253
7.3 系统的物理可实现性	261
7.4 信号的调制与解调	262
7.4.1 抑制载波振幅调制(AM-SC)与同步解调	263
7.4.2 振幅调制(AM)与包络解调	266
7.4.3 调幅信号的传输	270
7.5 连续信号的抽样与恢复	272
7.5.1 抽样信号的频谱分析	272
7.5.2 抽样定理和信号的恢复原理	274
7.5.3 实际系统中的信号抽样和恢复	279
7.6 脉冲幅度调制(PAM)和脉冲编码调制(PCM)	282
7.7 信号多路复用技术	284
7.8 小结和学习要点	287
习题	289

第 8 章 连续时间系统的状态变量分析	296
8.1 信号流图与状态方程的建立	296
8.1.1 信号流图分析法	296
8.1.2 状态方程的建立	303
8.2 连续系统的状态方程求解	307
8.2.1 状态方程的时域求解	307
8.2.2 状态方程的 s 域求解	309
8.2.3 由状态方程求系统函数	312
8.3 状态矢量的线性变换	314
8.4 连续系统的特性分析	316
8.4.1 系统的稳定性	316
8.4.2 系统的可控性和可观测性	317
8.5 小结和学习要点	320
习题	320
第 9 章 离散时间系统的状态变量分析	325
9.1 信号流图与状态方程的建立	325
9.1.1 信号流图分析法	325
9.1.2 状态方程的建立	328
9.2 离散系统的状态方程求解	330
9.2.1 状态方程的时域求解	330
9.2.2 状态方程的 z 域求解	331
9.2.3 由状态方程求系统函数	336
9.3 状态矢量的线性变换	337
9.4 离散系统的特性分析	339
9.4.1 系统的稳定性	339
9.4.2 系统的可控性和可观测性	340
9.5 小结和学习要点	343
习题	344
附录	347
部分习题参考解答	355
索引	371
参考文献	376

第1章

绪 论

古往今来,在人类社会中语音、图像和数据等各种消息都是通过某种特定形式来传递的,期间经历了原始的传递手法、初级的光通信、无线电通信等方式变迁。人们一直在努力探索更有效的途径来将消息以一定形式转换成信号进行传输,使其在传输距离、速度和可靠性及有效性等方面都得到了明显的改善。随着计算机技术、通信技术的迅猛发展,相关的理论研究工作也得到广泛的开展。到了现代通信阶段,对于实现信号在任意两点之间的传输,采用的不仅仅是传统的直接传输方式,而是更强调采用交换功能,即利用某些集中的转接设备组成复杂的信息网络的间接传输方式。与此同时,人们开始关注有关信号处理方面的问题,即对信号进行加工或变换,以削弱信号中的冗余内容,滤除混杂的噪声和干扰,或使信号变成更易分析与识别的形式。

在信息科学与技术领域中,常常综合利用通信系统、控制系统和计算机系统进行信号的传输、交换与处理。各种系统都是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体,而组成通信、控制和计算机系统的主要部件中包括了大量各种类型的电路(或电网络)或者光路(也称光网络)。广义上,系统的概念不仅限于电路、通信和控制方面,也包括各种物理系统和非物理系统,以及人工系统和自然系统。以现今技术,电信号与非电信号很容易实现转换,在实际系统中常常利用各种传感器将非电物理量转变为电信号,以便于传输与处理;或者通过新型光电转换器将电信号转变为光信号,以更适于大容量、超高速的信道传输。

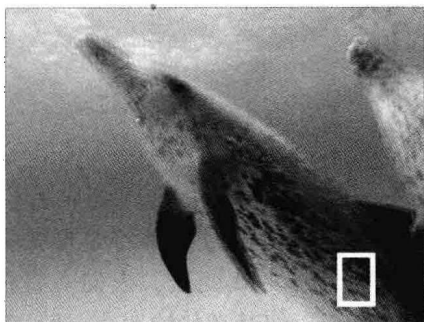
本章先从实际信号出发,分别引入连续和离散时间信号,重点介绍信号的主要分类、数学描述和基本运算,以及典型实例。再针对传输这些信号相应的连续和离散时间系统,重点介绍系统的主要分类、数学描述和基本特性,以及典型实例。最后,简单介绍信号与系统的主要分析方法及所用到的模拟计算工具,这些有关信号与系统的基本概念将为后面章节进一步深入的主题展开奠定必要的基础。

1.1 连续时间信号

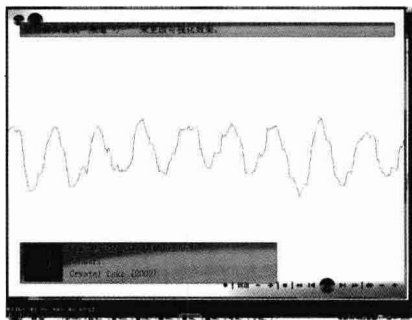
实际生活中众多的物理现象均可以用信号来描述,而信号中的信息则包含在一种随某个变量改变的变化形式中,这里为简化起见将此变量统一默认为时间 t 。实际信号归属于连续时间信号(continuous-time signal),或简记为连续信号(continuous signal),即对所有时间值都有定义,其中可任意取值的信号又称为模拟信号(analog signal)。

连续信号的典型例子有电视显示屏上的动态画面、播放器播放音乐时的声波、天线发射的电磁波和光信号处理的输入输出光特性变化等,分别如图 1-1(a)、(b)、(c)和(d)

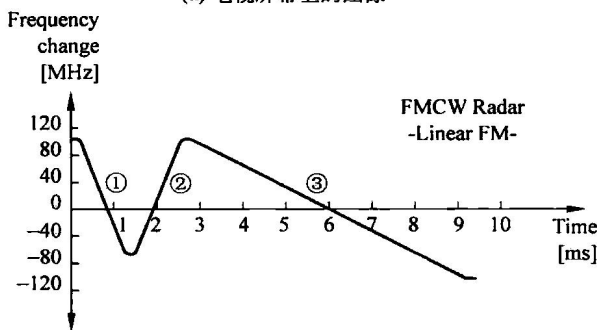
所示。虽然这 4 个实例中的信息变化均为时间的函数,但具体变化的信息量有所不同,例如图 1-1(a)显示了图像的动态变化,图 1-1(b)表现了声波压力的变化,图 1-1(c)给出了电波信号频率的变化,而图 1-1(d)则提供了光信号功率的变化。



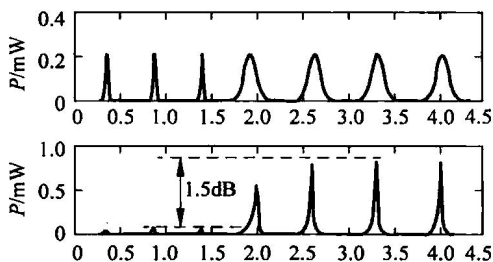
(a) 电视屏幕上的图像



(b) 播放器播放音乐时的声波



(c) 天线发射的电磁波信号



(d) 网络光缆传输的光信号

图 1-1 常见的信号实例

另外,还有诸如飞机飞行时受到的空气阻力随引擎产生的前行动力的变化,显然空气阻力作为前行动力的函数其变量就不是时间了。再有,如图 1-2 所示,(a)、(b)、(c)和(d)分别是在不同位置拍摄的风景画面,这里风景画面作为空间位置的函数其变量也不是时间了。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-2 美丽风景照

当然,书中各章节的主题和实例主要还是围绕时间这个最常用的变量展开的,而且为易于理解,讨论的主要对象集中在随时间变化的电信号,即电路系统中元件上流过的电流或施

加的电压等信号。因此,这里所处理的问题都是作为时间函数的信号和系统,但实际上讨论的有关信号和系统的所有分析方法也同样适合于非时间函数的信号和系统问题。

1.1.1 连续信号的数学模型与基本运算

鉴于此处所讨论的连续信号仅有一个独立变量,即连续时间变量(continuous-time variable) t ,由此信号的数学模型可以用 t 的函数表达式来建立,通式写为 $f(t)$,其中 f 表示任意连续信号的函数名。同时,连续信号还可以利用连续时域中的波形图来表示。

1. 不同类型的连续信号

一般可以根据信号的数值是实数或复数,将其称为实数信号(real signal)或复数信号(complex signal),其中复数信号可表示为

$$f(t) = f_1(t) + jf_2(t) \quad (1-1)$$

式(1-1)中 $f_1(t)$ 为信号函数的实部, $f_2(t)$ 为信号函数的虚部。

假设某连续信号 $f(t)$,如果存在非零的正数 T ,对于所有的 t 下式均成立:

$$f(t+T) = f(t) \quad (1-2)$$

则称其是周期为 T 的周期信号(periodic signal),其基本周期 T_0 就是满足式(1-2)的最小正数 T 。而且,对于所有的 t 和任意整数 m ,有

$$f(t+mT_0) = f(t) \quad (1-3)$$

例如,一个周期为 T_1 的矩形脉冲信号 $f(t)$ 满足

$$f(t+mT_1) = f(t)$$

其波形如图1-3所示。

假设 $v(t)$ 是某个电阻 R 两端上的电压,所产生的电流为 $i(t)$,则每欧姆电阻上的瞬时功率 $p(t)$ 可以定义为

$$p(t) = \frac{v(t) \cdot i(t)}{R} = i^2(t) \quad (1-4)$$

因此,每欧姆电阻上的总能量 E 和平均功率 P 分别为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} i^2(t) dt \quad (\text{焦耳})$$

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i^2(t) dt \quad (\text{瓦特})$$

而对于任意一个连续信号 $f(t)$,则可定义其归一化能量 E 为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (1-5)$$

以及其归一化平均功率 P 为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (1-6)$$

当且仅当 $0 < E < \infty$,即信号 $f(t)$ 存在归一化能量,且 $P=0$ 时,称 $f(t)$ 为能量信号(energy signal);当且仅当 $0 < P < \infty$ 时,即信号 $f(t)$ 存在归一化平均功率,且 $E=\infty$ 时,称 $f(t)$ 为功率信号(power signal)。另外,还存在既不满足能量信号特性又不满足功率信号特性的信号。

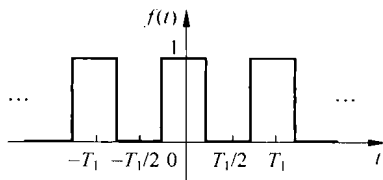


图 1-3 周期矩形脉冲信号的波形

例 1.1 试判别下列信号是否为周期信号,并确定周期信号的周期 T_0 和角频率 ω_0 :

(1) $f(t) = \sin(3t) + \sin(9t)$;

(2) $f(t) = [3\cos(5t)]^2$ 。

解:

(1) 由三角函数基本性质可知,上述信号表达式中的两项分别满足下列两式:

$$\sin(3t + 2\pi) = \sin(3t)$$

$$\sin(9t + 2\pi) = \sin(9t)$$

即此信号是由两个正弦周期信号线性叠加而构成,可以断定其为周期信号,且第一项的角频率 $\omega_1 = 3\text{rad/s}$,第二项的角频率 $\omega_2 = 9\text{rad/s}$ 。显然,这两项的角频率有公因子 3,因此有

$$\omega_0 = 3\text{rad/s}$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{3}\text{s}$$

(2) 由三角关系可知

$$f(t) = [3\cos(5t)]^2 = 9 \times \frac{1 + \cos(10t)}{2}$$

即信号是由一个直流信号与一个余弦周期信号线性叠加而构成,可以断定其为周期信号,且有

$$\omega_0 = 10\text{rad/s}$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{5}\text{s}$$

例 1.2 试判断下列信号是能量信号还是功率信号:

(1) $f(t) = 3e^{-t}u(t)$;

(2) $f(t) = \sin(2t) + \cos(4t)$ 。

解:

(1) 根据定义可计算该信号的归一化能量 E 为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |3e^{-t}u(t)|^2 dt = \int_0^{\infty} 9e^{-2t} dt = \frac{9}{2}$$

显然满足 $0 < E < \infty$ 。且根据定义可计算其归一化平均功率 P 为

$$\begin{aligned} P &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |3e^{-t}u(t)|^2 dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{T/2} 9e^{-2t} dt = 0 \end{aligned}$$

因此判定 $f(t)$ 为能量信号。

(2) 类似地,计算该信号的归一化能量 E 为

$$\begin{aligned} E &= \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\sin(2t) + \cos(4t)|^2 dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sin^2(2t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} \cos^2(4t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [\cos(8t) - \cos(4t)] dt \Rightarrow \infty \end{aligned}$$