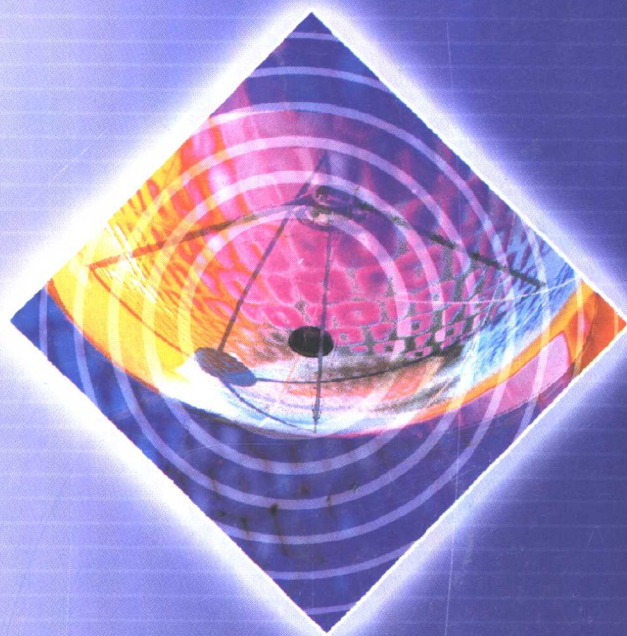




教育科学“十五”国家规划课题研究成果

信号与系统教程

燕庆明



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

信号与系统教程

燕庆明

高等教育出版社

内容提要

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果。内容适应培养应用型人才的要求。全书包括:导论、连续系统的时域分析、信号与系统的频域分析、连续系统的复频域分析、离散系统的时域分析、离散系统的 z 域分析和系统分析的状态变量法。全书简明易懂,风格独特,面向应用,图文并茂,适于教学。本书配有生动形象的多媒体 CAI 光盘,供学生自学参考。

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、计算机科学与技术、生物医学工程等专业本科生的“信号与系统”课程的教材,也可供广大科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统教程/燕庆明. —北京:高等教育出版社,
2004.1

ISBN 7-04-013014-9

I. 信... II. 燕... 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(2003)第 098358 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	北京机工印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2004 年 1 月第 1 版
印 张	21.5	印 次	2004 年 1 月第 1 次印刷
字 数	400 000	定 价	32.70 元(含盘)
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转变阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21 世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国 100 余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002 年 11 月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有 63 所高校申报了近 450 项课题。2003 年 1 月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批 9 项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003 年 3 月至 4 月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才培养特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题 research 在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培养探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容

和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

本书是为了适应高等学校“信号与系统”课程的教学改革和培养应用型人才的需要编写的,可作为电子信息类各专业本科生的教材。

人类社会已步入了信息时代,主导信息时代的电子科学和信息科学的发展日新月异,以计算机、微电子、光电子、智能科学、遥感科学、光学通信、高速数据处理为代表的信息技术,已达到很高的水平。同时,以可控核聚变、太阳能利用、空间发电站、微波传输为标志的新能源技术,以功能材料、结构材料、生物与仿生材料为主体的新材料科学,以及空间科学、化学、天文学和生命科学等,都渗透着信号与系统的概念。因此,本课程的重要地位是不言而喻的。

科学技术的飞速发展,使各类知识不断更新。就电子信息领域来说,最近20多年的变化是惊人的。关于信号与系统的理论和应用也愈来愈广泛、深刻。面对如此丰富的知识,究竟如何取舍才能适合于本科学生呢?古人云:易则易知,简则易从;天下之难作于易,天下之大作于细。编者认为,对于这样一门重要的技术基础课,仍应以信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法为教学重点,以简明易懂、循序渐进为方法,为学生打下适应变化、更新知识的基础。

基于以上的理念,本书对有关知识进行认真地研究、精选和提炼,并分7章讲述。不管信号分析还是系统分析,力求削枝强干,突出重点,而不是面面俱到。所讲授的内容,既注重概念、理论联系实际,又注意体现时代气息。在教学体系的安排上,以确定性信号和线性时不变系统为重点,从时域到变换域,从连续到离散,从输入输出描述方法到状态空间描述方法,前后呼应,把信号与系统的分析融为一体。为了适应发展和便于工程应用,本书还结合许多例子介绍了 MATLAB 工具在分析信号与系统中的使用方法。

另一方面,为了提高学生的综合素质,本书还在每章后编写了“扩展与启迪”的内容。这些内容并不一定都言及信号与系统本身,其重要特点是将科学技术与科学思想、科学方法及人文等许多知识相互渗透和融合,以便让学生开阔视野,启发思维,激发创新意识。

为了配合本书的教学,改革教学方法,本书还配有自行研制的信号与系统多媒体 CAI 课件。该课件扩展了教材的内容,生动形象,便于自学。为了便于教学,另外编写了教学指导书,其中包括教学指导和本书的全部习题解答。

书中打“*”号的内容不作基本要求,可供不同专业选学。教学的课内学时数由各学校根据实际需要自定。

本书 1~7 章由燕庆明编写,多媒体 CAI 课件由于凤芹和周治平负责制作。书稿由清华大学郑君里教授审阅,提出了许多宝贵的修改意见,在此特致衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有错谬之处,恳请读者指正。

编者

2003 年 8 月

于江南大学

策划编辑 韩 颖
责任编辑 曲文利
封面设计 于文燕
责任绘图 朱 静
版式设计 胡志萍
责任校对 朱惠芳
责任印制 杨 明

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 历史的回顾	1
1.2 信号的概念	3
1.3 系统的概念	6
1.4 线性系统的性质	10
1.5 信号与系统分析	14
1.5.1 信号分析	14
1.5.2 系统分析	16
扩展与启迪:数学方法的魅力	16
小结	17
习题	18
第 2 章 连续系统的时域分析	20
2.1 系统的微分方程及其响应	20
2.1.1 系统的微分方程	20
2.1.2 零输入响应与零状态响应	22
2.2 阶跃信号与阶跃响应	26
2.2.1 单位阶跃函数	26
2.2.2 一阶系统的零状态响应	27
2.2.3 阶跃响应	29
2.3 冲激信号与冲激响应	31
2.3.1 单位冲激函数	31
2.3.2 冲激响应	37
2.4 卷积及其应用	41
2.4.1 卷积的概念与性质	42
2.4.2 系统的卷积分析法	43
2.4.3 卷积的计算:图形扫描法	48
2.4.4 相关函数	50
* 2.5 特征函数及其应用	51
2.5.1 二阶系统的特征函数	52
2.5.2 二阶系统的冲激响应与阶跃响应	55
* 2.6 MATLAB 方法用于时域分析	60
扩展与启迪:系统方法之妙	62

小结	63
习题	64
第3章 信号与系统的频域分析	69
3.1 周期信号的分解与合成	69
3.1.1 周期信号的三角级数表示	69
3.1.2 周期信号的复指数表示	73
3.2 周期信号的频谱	77
3.2.1 周期信号频谱的特点	77
3.2.2 双边频谱与信号的带宽	78
3.3 非周期信号的频谱	82
3.3.1 傅里叶变换	82
3.3.2 常用非周期信号的频谱	84
3.3.3 能量信号与功率信号	90
3.4 傅里叶变换的性质与应用	92
3.4.1 脉冲展缩与频带的关系	92
3.4.2 信号的延时与相位移动	93
3.4.3 信号的调制与频谱搬移	95
3.4.4 周期信号的傅里叶变换	96
3.4.5 卷积定理及其应用	98
3.4.6 时域微分特性	100
3.4.7 时域积分特性	101
3.5 系统的频域分析	103
3.5.1 系统函数与不失真传输	103
3.5.2 信号通过理想滤波器	105
3.6 取样定理及其应用	108
3.6.1 取样信号	108
3.6.2 取样定理	109
3.7 数据采集的工程问题	114
3.8 频域分析用于通信系统	116
3.8.1 信号的调制	116
3.8.2 正弦调幅与频分复用	118
3.8.3 脉冲幅度调制与时分复用	121
3.9 MATLAB 方法用于频域分析	123
扩展与启迪:对称之美	126
小结	128
习题	129
第4章 连续系统的复频域分析	134

4.1 拉普拉斯变换	135
4.1.1 拉普拉斯变换的定义	135
4.1.2 常用信号的拉氏变换	137
4.2 拉普拉斯变换的性质与应用	140
4.2.1 延时特性	140
4.2.2 复频移特性	143
4.2.3 微分定理	144
4.2.4 积分定理	145
4.2.5 卷积定理	147
4.3 拉普拉斯反变换	149
4.4 系统的 s 域分析	154
4.4.1 微分方程的拉普拉斯变换解法	154
4.4.2 电路的 s 域模型	156
4.4.3 s 域分析法的应用	158
4.5 系统函数 $H(s)$	161
4.5.1 $H(s)$ 的定义与性质	161
4.5.2 系统的方框图表示与模拟	166
4.6 系统函数的零、极点	170
4.6.1 $H(s)$ 的零、极点	170
4.6.2 $H(s)$ 的零、极点分布与时域特性的关系	172
4.6.3 $H(s)$ 的零、极点分布与频域特性的关系	174
4.7 线性系统的稳定性	177
4.7.1 系统稳定的概念	177
4.7.2 稳定性判据	179
4.8 s 域分析应用于控制系统	181
4.8.1 开环与闭环控制	181
4.8.2 系统阶跃响应的动态指标	185
4.9 MATLAB 方法用于复频域分析	187
4.9.1 部分分式展开	187
4.9.2 拉氏变换与反变换	188
4.9.3 零、极点分析	189
扩展与启迪:善用模拟	191
小结	191
习题	193
第5章 离散系统的时域分析	199
5.1 离散时间信号	199
5.1.1 离散信号的概念与表示	199

5.1.2 离散信号的基本运算	201
5.2 离散时间系统	205
5.2.1 差分方程	205
5.2.2 离散系统的时域模拟	207
5.2.3 系统的响应	208
5.3 卷积和及其应用	210
5.3.1 离散信号的分解与卷积和	211
5.3.2 离散系统的零状态响应	215
5.4 MATLAB 方法用于离散时域分析	218
5.4.1 求解单位响应	218
5.4.2 计算离散卷积和	219
扩展与启迪:连续与离散	220
小结	221
习题	221
第 6 章 离散系统的 z 域分析	223
6.1 z 变换	223
6.1.1 z 变换的定义	223
6.1.2 典型序列的 z 变换	225
6.2 z 反变换	228
6.2.1 幂级数展开法(长除法)	228
6.2.2 部分分式展开法	229
6.3 z 变换的主要性质	232
6.3.1 线性性质	233
6.3.2 移位特性	233
6.3.3 尺度变换	235
6.3.4 卷积定理	235
6.4 离散系统的 z 域分析	238
6.4.1 差分方程的 z 变换解	238
6.4.2 离散系统的 z 域模拟	241
6.5 系统函数 $H(z)$	242
6.5.1 系统函数 $H(z)$ 的定义	243
6.5.2 $H(z)$ 的极点分布与 $h(n)$ 变化模式的关系	246
6.6 离散系统的稳定性	248
6.6.1 z 变换与拉氏变换的关系	248
6.6.2 离散系统的稳定性	251
6.7 数字信号处理	253
6.7.1 离散系统的频率特性	253

6.7.2 数字信号处理的概念	256
* 6.8 离散时间傅里叶变换	259
* 6.9 MATLAB 方法用于 z 域分析	261
6.9.1 函数 $F(z)$ 的部分分式展开	261
6.9.2 零、极点分析	262
6.9.3 z 变换与反变换	264
6.9.4 离散时间傅里叶变换 (DTFT)	265
6.9.5 低通 FIR 数字滤波器设计	265
扩展与启迪: 移植而旁通	266
小结	267
习题	268
第 7 章 系统分析的状态变量法	271
7.1 线性系统的状态方程	272
7.1.1 状态变量和状态方程	272
7.1.2 动态方程的一般形式	276
7.2 状态方程的解	279
7.2.1 状态方程的时域求解	279
7.2.2 状态方程的 s 域求解	280
* 7.3 非线性系统的状态方程	285
7.4 离散系统的状态变量分析	287
7.4.1 离散系统的状态方程	288
7.4.2 离散状态方程的时域解	289
7.4.3 状态方程的 z 变换解	290
* 7.5 MATLAB 方法用于状态变量分析	291
7.5.1 状态方程的解	291
7.5.2 系统函数矩阵的计算	292
扩展与启迪: 非线性与复杂性	294
小结	296
习题	297
附录 A 矩阵和矩阵函数	300
附录 B 波特图	310
附录 C 信号与系统 CAI 教程光盘使用方法	316
部分习题答案	318
索引	325
参考文献	329
结束语	330

第 1 章

导 论

1.1 历史的回顾

人类社会已走过了辉煌的 20 世纪。过去的 100 年间,科学的进步和技术的创新奇迹般地不断涌现,使人们享受着现代文明的乐趣。计算机已进入了社会的各个角落;无论人们走到哪里,随时随地可与亲人和朋友进行电话交流;越来越先进的电视更加深刻地影响着人们的生活;无数的自动生产线生产着工业、农业和生活等用品;人类利用航天技术登上了月球等天体;新材料、新能源、生物、海洋的研究硕果累累;人类已从微电子时代走向信息时代。

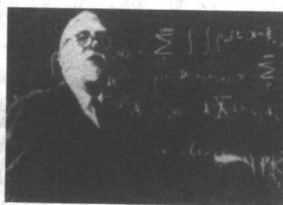
在众多的科学领域中,信号与系统学科的发展令人激动不已。20 世纪 40 年代末创立的三大科学思想和理论,即系统论、信息论和控制论成为许多学科的理论根基。系统论是美国生物学家贝塔朗菲创立的,他为确立适用于系统的一般原则做出了贡献。信息论是美国数学家香农创立的,它成为现代通信理论的基础。控制论是美国数学家维纳提出的,它促进了自动控制、通信、计算机、人工智能理论及应用的发展。图 1-1 显示了三位科学家的风采(彩图见插页)。



1948 年贝塔朗菲
创立系统论



1948 年香农创立信息论



维纳(1894—1964)美国数学家。1948 年创立控制论,促进了通信、计算机和人工智能等理论的发展。

图 1-1 贝塔朗菲(左)、香农(中)、维纳(右)

任何科学理论的创立都不是偶然的。系统论、信息论和控制论的提出,都是在吸取前人许多成果的基础上通过深刻思考建立的。1822 年,法国数学家傅里叶(J. Fourier, 1768—1830)证明了将周期信号展开为正弦级数的理论,为信号的分析 and 处理打下了基础。法国数学家拉普拉斯(P. S. Laplace, 1749—1825)于 19

MAG 53/10

世纪初提出了拉普拉斯变换方法,为后来电路和系统的分析提供了有力工具。1831年,英国人法拉第(M. Faraday, 1791—1867)发现了电磁感应现象。1837年,美国人莫尔斯(S. F. Morse, 1791—1872)发明了电报。1864年,英国科学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)提出了电磁波理论。1875年,美国人贝尔(A. G. Bell, 1847—1922)发明了电话。1894年,意大利的马可尼(G. Marconi, 1874—1937)和俄国的波波夫分别发明了无线电。马可尼利用赫兹的火花振荡器作为发射器,实现了无线电信号的传递。1907年,美国人福斯特(L. D. Forest)发明了真空三极管,实现了对微弱信号的放大。1946年,第一台电子计算机(ENIAC)在美国宾州大学莫尔电子工程学院研制成功。1947年,美国贝尔实验室的布拉丁、巴丁和肖克利研制成功第一只点接触晶体管,翻开了半导体应用历史的第一页,大大促进了电子工程、通信、计算机等技术的发展。图1-2为电报、电话和无线通信发明者的照片(彩图见插页)。



图1-2 莫尔斯(左)、贝尔(右)、马克尼(下)

广播、现代通信、微电子、航天等领域的发展也是难忘的。1912年,阿姆斯特朗组装了第一台超外差收音机。1916年,实现了人类第一次语言和音乐的无线电广播。1925年,英国的贝尔德(J. L. Baird)发明了电视。1954年,彩色电视试播成功。1958年,美国的基尔比利用半导体单晶硅材料研制成第一片集成电

路(IC)。1965年,世界上第一颗地球同步通信卫星发射升空,从而推动了电话、电报、数据传输和电视转播的革命。1998年11月,铱星通信正式启用,从而使通信技术达到了更高的水平。这些成就,又反过来促进了关于信号、信息、系统的理论不断完善。图1-3为早期的无线电广播和现代通信技术情况(彩图见插图)。



图 1-3 早期无线电广播和现代通信技术

展望电子科学与技术的发展,人类将生活在更加奇妙的世界。现在,移动通信、光纤通信、卫星通信、智能芯片、巨型计算机、高清晰度电视等正日新月异地发生着变化。信号与系统、信息处理理论不断发展,将进一步引起工业系统、通信系统、控制系统、计算机系统、测量系统、生物医学系统的重大变革。

1.2 信号的概念

宇宙中的一切事物都处在不停的运动中,物质的一切运动或状态的变化,广义地说都是一种信号(signal),即信号是物质运动的表现形式。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。在通信系统中,

信号就是传送各种消息(message)的工具。所谓消息,就是通过某种方式传递的声音、文字、图像、符号等。例如,电话中传送的声音,电报中传送的电文,电视系统中传送的图像,雷达中测出的目标距离、方位、速度等数据。通过各种消息的传递,使受信者获取各种不同的信息(information)。通俗地说,信息是指具有新内容、新知识的消息,它排除了消息中那些不确定性的东西。

通常,传送消息的信号形式都是随时间变化的。如温度信号、压力信号、光信号和电信号等,它们反映了事物在不同时刻的变化状态。由于电信号处理起来比较方便,所以工程上常把非电信号转化为电信号传输。基于电信号的重要性,本书仅研究电信号,并把它简称为信号。

在电系统中,信号的两种主要形式是电压信号和电流信号,可分别用时间函数 $u(t)$ 和 $i(t)$ 表示。信号也可一般地记为 $f(t)$ 、 $y(t)$ 等。

信号随时间变化的规律是多种多样的,可从不同角度进行分类。

确定性信号与随机信号

若信号随时间的变化服从于某种确定规律,能用确定的数学函数表达,对任一确定的时刻,信号有确定的函数值,这种信号称为确定性信号。大家熟悉的正弦信号就是如此。相反,如果信号的取值在不同时刻随机变化,不可能预先确切知道它的变化规律,则称之为随机信号或非确定性信号。噪声就是典型的随机信号。诚然,由于信号在传输过程中不可避免地要受到各种干扰,所以理想的确定性信号是不存在的,但作为科学的抽象,研究确定性信号的特性仍是十分重要的。本书只研究确定性信号。

图 1-4 给出了几种简单信号的波形,其中图 1-4(a)~(e)所示各信号均是确定性信号。而图 1-4(f)所示信号是随机信号,无法写出其函数表达式。

周期信号与非周期信号

周期信号是按某一固定周期重复出现的信号,它可表示为

$$f(t) = f(t + nT)$$

式中 T 为周期, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。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,如图 1-4(c)所示。非周期信号有两种表现形式:一种是仅在某些时间区间内存在的信号,如图 1-4 中(a),(b),(e),这类信号统称为脉冲信号;另一种是拟周期信号,如信号

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

这里, $f(t)$ 的两个余弦分量的频率之比为无理数。这类信号就称为拟周期信号或概周期信号。它在工程上很少应用,本书不予研究。

连续时间信号与离散时间信号

不论周期信号还是非周期信号,若从时间变量的取值是否连续出发,又可以