



普通高等教育“九五”国家级重点教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

SIGNALS & SYSTEMS

信号与系统

第三版
上册

郑君里 应启珩 杨为理



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“九五”国家级重点教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

信号与系统

Xinhao yu Xitong

第三版

上册

郑君里 应启珩 杨为理



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书第一、二版分别于 1981 年和 2000 年与读者见面。第三版与前两版之研究范围、结构层次大体相同,仍然是讨论确定性信号经线性时不变系统传输与处理的基本概念和基本分析方法,从时域到变换域,从连续到离散,从输入输出描述到状态空间描述,以通信和控制工程作为主要应用背景,注重实例分析。

第三版保持了前两版之特色;注重结合基本理论融入各类工程应用实例。新版对这些例子进行了修订和更新,使全书具有强烈的时代感;保留了第六章信号矢量空间分析的内容,并有适当修订与补充,从而突显本书与国内、外同类教材的重要区别;全书结构有较大灵活性,可适用于通信电子类和非通信电子类的多种理工科专业的本科生教学。

全书共十二章,分两册装订,上、下册各六章,各章目与第二版基本一致。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统.上册/郑君里,应启珩,杨为理编著.—3版.
—北京:高等教育出版社,2011.3
ISBN 978-7-04-031519-6

I. ①信… II. ①郑… ②应… ③杨… 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(2010)第 262015 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京凌奇印刷有限责任公司

开 本 787×960 1/16
印 张 28.25
字 数 520 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1981 年 10 月第 1 版
2011 年 3 月第 3 版
印 次 2011 年 3 月第 1 次印刷
定 价 40.90 元

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

物料号 31519-00

第三版前言

1978年撰写《信号与系统》第一版初稿至今已历经32年(见本书下册后附参考书目[1])。在此期间,曾改写第二版^[2],于2000年与读者见面,此后又出版了风格独特的教学辅导参考书^[4],MATLAB实验配套教材^[5]以及第二版的简明版《信号与系统引论》^[3]。这些教材相互支撑,为读者提供了方便。当然,大家最为关心第三版何时写好。为了准备这项工作,多年来我们努力研究本课程的历史、现状与前景,发表了多篇研究报告,其中2008年撰写的文章^[41]具有代表性,该文中的观点阐明了修订信号与系统教材的环境背景和指导思想,建议读者参阅。结合该文要点以及多年来授课的感受,特别是考虑到与众多兄弟院校老师长期、密切交流得到的启发和帮助,作者认识到以下诸方面的议题很值得认真分析与反复研究:

(1) 由于确定性信号经线性时不变系统传输与处理的研究方法已相当成熟,本课程的教学要求和基本内容相对稳定。虽然在某些方面受到最新技术发展的冲击,然而,尚未构成大幅度更新和重组课程体系的新局面,因而,本课程的发展前景可表述为:在相对稳定中逐步追求变革。

从第二版到第三版,本教材的教学目标和研究范围没有改变。第三版的章目结构与第二版完全相同,仍为十二章,分上、下册各六章。全书构成一个整体,不可分割。请不要认为上册只讲连续、下册只讲离散,实际上,许多章节对这两大类问题都在交叉展开讨论。特别需要指出,5.10节关于PCM通信系统的介绍是本书的突出特色之一。我们讲授离散部分的切入点正是PCM通信,在初步认识这一实际工程系统之后再讲差分方程会取得更好的教学效果。目前,国内外同类教材对于连续和离散两部分的选材与引出顺序有不同的理解,在参考书目[4]第2.5节和参考书目[41]中有深入分析,敬请各位老师关注。本书1.8节的图1-47对全书各章的联系有详细说明,请查阅。框架结构虽无明显改变,而具体的内容论述有许多更新之处,变革修订的原则将在下文陆续给出。

(2) 要处理好稳定与变革的关系,必须在讲授传统内容的过程中充分体现时代气息,注重经典理论的讲述与引入最新技术的相互融合。以当代信息科学的观点理解、审视、组织和阐述传统内容。所谓课程更新往往体现在应用领域的演变,而已经成熟的经典理论却仍然适用。第二版教材特别注重结合基本概念

介绍各类应用实例(如 PCM 通信、CDMA 通信、码速与带宽、匹配滤波器、小波变换以及人口增长估测、宏观经济模型、住房贷款偿还计算等)。这些讨论有助于激发学生的学习志趣和热情,推动他们灵活、深入地掌握基本概念,给读者留下深刻印象,这是本书最重要的特色。

改写第三版的首要任务就是要使原书应用实例丰富、与理论分析密切融合之特色更加突显。因此补充或更新了大量应用实例,如新增加之通信系统多径失真的消除(第二、四、五、七章)、雷达测距原理(第三章)、对电信网络的初步认识(第五章)、OFDM 通信系统原理(第九章)等。许多生动活泼的实例分析渗透于全书各章,读者随手翻看可以激发起强烈的阅读乐趣。

(3) 第二版曾增写信号的矢量空间分析一章(第六章),取得了很好的教学效果。这里涉及的基本概念在许多后续课程中需要引用,而按照以往的习惯,尚未见到国内外哪种教材或哪门课程对此进行系统的入门介绍。本章的撰写成功地改变了这种状况。第三版全文保留了第二版第六章的内容,并对例题和习题进行了适当的修订和补充。

教学改革必须注重结合国情。我们的学生从高中到大学历经系统深入的数学课程学习,承受了严格而艰苦的训练,他们对数学基础知识及其实际应用问题的兴趣要明显超过国外的同龄学生。而本课程的核心任务正是要构建一座从数学到物理和工程技术的桥梁,引导学生从理论学习过渡到专业工程训练。本书的重要特征在于适应国情,使学生一方面对信号处理的学习步入更深层次,为学好后续理论课程打好基础,另一方面也认识到数学并不神秘,许多数学工具非常有用,它就在我们身边。

必须注意,加强数学与物理和工程的结合决非盲目依赖数学推导和分析。在修订过程中对于第二版一些比较繁琐的数学推证进行了压缩或删除。力求帮助读者在自学过程中抓住要领。例如原第二章 δ 函数匹配系数的代数求解,又如原第十二章状态方程时域求解方法之介绍等都做了较大修改或删除。

(4) 信号与系统课程的实验教学可以结合 MATLAB 软件应用安排编程练习。目前,这种做法已取得国内外众多授课教师的共识。在具体实现方法上有两种形式,一是在理论教材的每一章后附加相应练习,另一种是单独编写 MATLAB 编程练习教材,适当增加综合性训练题目,这需要稍多一些课时。经过几年来的实践试点,我校电子系采取了后一种做法,并且出版了相应的教材(见参考书目[5])。

(5) 第二版教材结构具有很大灵活性,第三版教材继续保持这一特色。本书可适用于本科通信电子类与非通信电子类的多种专业,全书篇幅较大。任课教师可以根据各校实际情况进行不同章节的选取与组合,构成深度和学时有区别的课程。

目前,我国最常见的两种信号与系统组课方案示意如图1。简要地说,就是三个变换加(或不加)状态变量。大多在一个学期内讲完,学时数为64~72[另加实验学时,各校授课方案有较大区别,如上文(4)所述。]

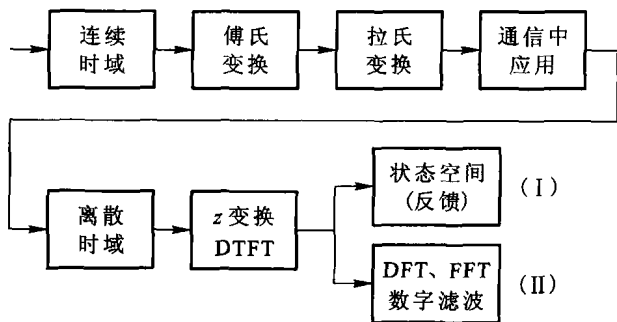


图1 两种信号与系统组课方案

图1中的第Ⅰ方案主要用于通信、电子信息工程、生物医学工程等专业。在此课之后都还设置了必修课数字信号处理,而控制理论课程不一定必修。第Ⅱ方案主要用于后设控制理论为必修,而数字信号处理不一定必修之专业,如自动化、电气工程及其自动化、计算机等,此外,电子科学技术(物理、光电子、微电子等)专业大多也按此方案设课。有些采用第Ⅱ方案设课的院校将课程名称改为“信号分析与处理”以示与前者之区别。

第Ⅰ方案的授课内容与本书第一、二、三、四、五、七、八、十一、十二等章相对应,而第Ⅱ方案则覆盖第一、二、三、四、五、七、八、九、十等章。如果课时允许,建议在第五章之后讲授第六章。教学辅导参考书^[4]第3.6节提供了这一章的授课讲稿,建议任课老师参阅。

1995年,国家教委工科电工课程教学指导委员会按上述第Ⅰ方案制定了教学基本要求。2004年,教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会又按Ⅰ、Ⅱ两方案分别制定了两种基本要求。

本书的内容完全可以满足上述两种基本要求的需要,同时有较多的扩充。在授课过程中可以灵活选取所需素材。

当选用第Ⅰ方案时,对于第十一章(反馈系统)的处理有较大的灵活性。可以根据需要选讲某些节的有关内容,如果学时受限,也可只讲11.6节(信号流程图)为第十二章做好准备即可。此次修订对该节的例题进行了较多调整,力求密切联系实际、由浅入深、循序渐进。

实践表明,若按第Ⅱ方案授课,在学习第十章(滤波器)时往往会遇到一些困难。这是由于该章内容涉及面太宽,讲述层次错综复杂,数学推证也比较繁琐,

不容易抓住重点。针对这一情况,第三版该章前4节的内容做了较大调整(后面各节也有一些修改)。原第二版是先讲模拟滤波器电路实现、后讲逼近,而第三版将逼近提前,可以跳过模拟电路实现直接进入数字滤波器。对于许多数学推证也做了重新整理和简化。预期这样修改将有助于更有效地利用课时,给读者带来方便。此外,还可参阅教学辅导参考书^[4]第3.10节对该章学习要点的解读,这将有助于自学或备课。

在我国,由于专业划分过细,许多教材缺乏灵活性,不能适用于多种专业。这种情况不利于扩大学生的知识面,掌握宽厚的理论与实践基础。与此密切相关的现象是课堂上照本宣科,讲授内容与教材几乎完全一样,很难培养学生的自学能力。本书第二版在这方面进行的改革尝试基本上取得了成功。我们期盼第三版在灵活性方面能够取得更好的效果。

写入教材而课堂上没有讲授的内容在许多方面可以发挥非常重要的作用:首先,有利于扩展视野、培养自学能力;其次,与后续课程的适当重复有利于学生从多角度观察和理解同一问题,例如,本书第九章9.2节关于傅里叶分析四种形式的比较,无论在本课程中是否讲授,以及在学习数字信号处理课程之前或之后阅读,都会在综合掌握基本理论核心问题方面受到启发;再次,有些素材为参加科学研究工作提供了宝贵的参考资料,如第十章各种滤波器的原理与性能以及各类滤波器之比较;最后,全面、综合性扩展知识面将十分有利于报考研究生的综合复习。任课老师的职责之一是引导学生在课堂之外加强自学、相互讨论,充分发挥教材的上述各项功能。这些都是构成培养高素质人才不可或缺的教学环节。

本书撰写执笔工作全部由郑君里完成,应启珩、杨为理共同研讨结构和内容,并校阅了部分书稿。

在清华大学,目前共有9个专业设置信号与系统为本科必修课程。教学任务分散在6个系各自完成,授课讲员已达数十人,曾参与辅导工作的青年教师和助教博士在百人以上。多年来作者与各位同事和众多博士生的切磋、研讨以及授课过程中和学生的密切交流,对本书写作有很多重要的启发和帮助。

高等教育出版社各位编辑与作者的通力协作为本书的出版创造了十分有利的条件。多年来各兄弟院校的老师 and 学生们以多种方式与作者坦诚交换意见,并对本书写作给予很多关心和支持,在此一并深致谢意。

限于水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

作 者
2010年6月于清华园

第二版前言

1978年撰写本书初稿至今已历经20年,注意到原书的大部分内容仍在有效使用,也由于工作繁忙,因而迟迟未作修订。

20年来,这一学科领域的理论与实践研究迅速发展,分析方法不断更新,技术应用范围日益扩展。然而,对国内、外许多院校的调查或相互交流表明,就本科生“信号与系统”课程而言,它的教学要求和基本内容却相对稳定。虽然在某些方面受到最新技术发展的冲击,但是尚未构成大幅度更新和重组课程体系的局面。与此相应,十多年来,本书第一版按需求统计而确定的重印册数逐年上升,实际用量供不应求。面对这一现实,我们结合教学实践,在广泛听取并研究教师与学生意见的基础上,逐步明确了编写本书第二版的追求目标,这就是在相对稳定中力求变革,在讲授传统内容的过程中充分体现时代气息,处理好经典理论的论述与最新技术引入的相互融合。以当代信息科学的观点理解、审视、组织和阐述传统内容。

本书(也即本课程)的教学目的、要求和体系层次与第一版大体相同,仍然是研究确定性信号经线性时不变系统传输与处理的基本概念和基本分析方法,从时间域到变换域,从连续到离散,从输入输出描述到状态空间描述,以通信和控制工程作为主要应用背景,注重实例分析。

在本课程中,连续时间信号与系统和离散时间信号与系统讲授顺序的争执已持续多年。实践表明,很难说某种顺序显示突出的先进性而代表改革方向,从国内、外大量教材情况来看,多种形式并存的局面将长期持轩。本书第二版以实际应用为主要依据,兼顾离散与连续的选材,前面较多章、节按照先连续后离散的次序讲授,稍后几章则是连续与离散交叉并行研究。

当前,在国际流行的科技应用软件中,MATLAB具有广泛影响。在信号处理技术领域,这一软件的应用也占据重要地位。本课程的计算机练习应帮助学生尽早认识或熟悉MATLAB的应用。与本书相配合,我们将这方面的内容编入了另一本教材之中^①,建议将本课程与数字信号处理课程统一考虑,从这本教材中选取适当的题目,安排学生的计算机练习。

另一方面,由于计算机辅助设计的广泛应用,还需要认真考虑从传统的教学

^① 谷源涛、应启珩、郑君里著《信号与系统——MATLAB综合实验》,高等教育出版社,2008年。

内容中削弱或删除陈旧的部分。例如,SPICE 程序的普及促使我们不必要求学生掌握某些复杂电路(或复杂波形)求响应的解析方法,因而允许大力压缩拉氏变换的有关内容。

本课程的基本概念和方法并不十分复杂,教学效果成败的关键不在于学生认识和记忆了多少定义、定理的条文,而应注重正确引导学生运用数学工具分析典型的物理问题。所谓课程更新往往体现在应用领域的演变,而已经成熟的经典理论却仍然适用。第二版特别注重密切结合基本概念介绍通信、控制、信号处理方面的最新应用实例(在正文、例题、习题中都会出现),这些实例讨论有助于激发学生的学习志趣和热情,推动学生灵活、深入地掌握基本概念。

第二版全书共 12 章,上、下册各 6 章。前 3 章包括绪论、连续系统的时域分析、傅里叶变换。各章的主题仍同第一版。第一章增加了信号波形的运算与系统模型的方框图。第二章对分配函数的性质和应用作了较详尽的补充。第三章着重讨论傅里叶变换的基本概念,而将一些较深入的问题移后到第五、六章。第四章是拉普拉斯变换及其应用,经重新组织,它涵盖了第一版第四、五两章的主要内容,从而使这部分的篇幅有较大压缩。第五章傅里叶变换的应用是第三章的继续,结合滤波、调制和抽样三方面的概念增补了较多的应用讨论和实例分析。第六章是重新编写的,主题是信号的矢量空间分析。这里涉及的基本概念在许多后续课程中需要引用,而按照以往的习惯,很少见到哪种教材或哪门课程对此作系统的入门介绍。为改变这一状况,我们将正交、相关、帕塞瓦尔定理、柯西-施瓦茨不等式等概念和一些应用实例组织在一起,以统一的数学与物理方法讲授,使学生对信号理论的学习步入更深的层次,为学好后续课程打下基础。第七至九章的内容也与第一版大致相同,包括离散时间信号的时域分析、 z 变换、离散傅里叶变换及其快速算法。在第七章增补了反卷积(解卷积)的基本概念。第八章适当扩充了序列傅里叶变换性质的讨论,以便于和第九章的内容衔接。第九章增加了离散余弦变换和沃尔什变换的有关内容。第十章模拟与数字滤波器和第十一章线性反馈系统都是重新编写的。前者初步介绍模拟与数字滤波器的基本原理和设计方法;后者使本书在控制工程的应用背景方面适当加强,此外,将信号流程图也移入此章。第十二章与第一版最后一章的内容一致,讨论状态空间分析,在此,注重拓宽应用实例的引入,给出了一些非电领域应用状态空间方法的例子。

全书篇幅较大,有利于授课教师灵活选材,也为学生自学开创了较好的条件。可以按照不同章节的选取与组合,构成深度和学时有区别的课程。从目前国内多数院校的需要来看,推荐以下两种组课方案供参考(下列数字为章号):

$$1-2-3-4-5-7-8 \begin{cases} 12 \\ 9-10 \end{cases}$$

第一种方案适用于在本课程之后继续学习数字信号处理而不设控制理论课程的

情况;第二种方案则适合于在本课程之后专门开设控制理论而不再学习数字信号处理的有关专业。即使按某些章目组织教学,对于每章内各节仍有较大的灵活选取余地,如第二章微分方程的经典分析、 δ 函数的深入讨论,第四章用拉氏变换解电路的各种练习以及第七章差分方程的时域求解等都可适当删减。在第二方案中,对于第十章建议只选讲数字滤波器的有关内容(包括逼近函数),删除模拟滤波器等部分。另一方面,有些章目虽未在上述方案中列入,也应介绍其中的要点或个别小节。在第一方案中,讲授状态变量分析之前需补充信号流图的概念,还可考虑简要介绍反馈的基本知识(都需要从第十一章选材)。此外,两种方案都可适当选择第六章的要点为学生初步建立信号矢量空间的概念。近年来,我校教学实践表明,以上两种方案都能在一学期内完成,讲课学时不超过64。当然,授课教师可根据学生的能力以及培养计划的总体要求设计其他多种选材组课方案。一般讲,无论何种方案都不宜照本宣科授课,书中相当多的内容应当留给学生自学或组织讨论。我们相信,选用本书作为教材将有助于推动讲课、自学与课堂讨论的密切结合。第一版的实践表明,读者在学完信号与系统课程之后相当长的时间内仍然需要反复翻阅本书。

本书除用作高校教材之外,我们期望它对于科研和工程技术人员的在职自学与知识更新能产生一定的积极作用。

本书第二版由郑君里主编,第二章由应启珩执笔,第十章由应启珩、郑君里执笔,其余各章由郑君里执笔。杨为理与执笔者共同研讨并校阅了第三、五、七、八各章,张宇博士协助完成并校核了若干重要公式的推证。山秀明、刘序明、王文渊、叶大田、乐正友、郑方等分别校阅了各部分初稿或结合授课对修订工作提出建议。必须指出,多年来作者与各位同事和众多博士生的经常研讨,以及授课过程中与学生的密切交流,对本书写作有很多重要的启发和帮助。

全书承清华大学电子工程系陆大绘教授审阅,提出许多指导性修改意见,保证了书稿质量的进一步提高,作者表示衷心感谢。

本书于1997年经国家教育委员会组织专家评审,确定为普通高等教育“九五”国家级重点教材立项选题。书稿经教育部“电路、信号系统和电磁场课程教学指导小组”审阅,同意作为国家级重点教材出版。

高等教育出版社各位编辑与作者的愉快合作为本书出版创造了十分有利的条件。从1981年至今,各兄弟院校的老师 and 同学们以多种方式与作者坦诚交换意见,并对本书修订工作给予很多关心与支持,在此一并深致谢意。

限于水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者指正。

作 者

1999年12月

于清华大学电子工程系

第一版前言

近年来,作者为无线电电子学系开设“信号与系统”课程,同时编写了这方面的参考教材。现将该教材整理、扩充,编成本书。

本课程的任务在于研究信号与系统理论的基本概念和基本分析方法。初步认识如何建立信号与系统的数学模型,经适当的数学分析求解,对所得结果给以物理解释、赋予物理意义。由于本学科内容的迅速更新与发展,它所涉及的概念和方法将十分广泛,而且还在不断扩充。本书试图在规定的要求与范围之内,使选材适当充实、丰富。在用作教材时,可以灵活选取所需内容。

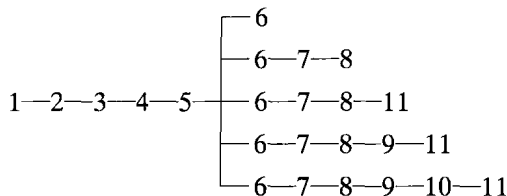
本书的范围限于确定性信号(非随机信号)经线性、时不变系统传输与处理的基本理论。从时间域到变换域,从连续到离散,从输入-输出描述到状态描述,力求以统一的观点阐明基本概念和方法。

为学习本课程,读者应有一定的数学基础和电路分析基础。书中涉及的数学内容主要包括微分方程、差分方程、级数、复变函数、线性代数等。除对差分方程作适当讲解之外,其他方面将直接引用有关结论。在运用这些数学工具时,注重解决工程问题,加强物理概念的解释。本课程与先修课“电路分析基础”联系密切,虽有某些重复,但分析问题的着眼点有所不同。在那里,从电路分析的角度研究问题,而本书则以系统的观点进行分析。

通过本课程的学习希望激发起学生对信号与系统学科方面的学习志趣和热情,使他们有信心也有能力逐步适应这一领域日新月异发展的需要。首先要适应几门重点后续课程的需要,这些课程是:电子线路(也可并行学习)、网络理论、通信系统、控制理论、数字信号处理,等等。

全书共包括十一章。第一至六章讨论连续时间信号与系统,第七至十章讨论离散时间信号与系统(第七章时域分析、第八章 z 变换与 z 域分析、第九章离散傅里叶变换及其快速算法、第十章沃尔什变换),第十一章集中研究系统的状态变量分析(包括连续与离散,时域与变换域)。

本书篇幅稍大,涉及的问题比较广泛,直接用全书材料组成一门一学期的课程是不适当的。可以根据先修与后续课程的不同情况按以下几种方式(序号表示章号)选择所需部分,组成深度和学时有区别的课程:



在每章内还安排有一些加宽加深的内容,标有“*”号,舍去这些小节,不影响后续部分的学习。除内容选择方面有机动性之外,在讲授顺序上也可以作灵活调整。例如,绪论中的 1.5、1.6 节可移至第三章开始时讲授;又如,讨论傅氏变换与拉氏变换原理和应用的第三至六章,可改按 3-6-4-5 或 4-5-3-6 的顺序使用(这时要对第 6.1、6.3、6.8 或 4.2、4.13 等节作调整)。

配合基本理论与分析方法的学习,书中备有一定数量的例题和习题,可酌情选用,部分难度稍大或比较繁复的习题标有“*”号,不应作为对学生的一般要求。书末附有习题答案,仅供参考。在应用计算机方面,考虑到目前的实际情况,没有给出计算程序,但在某些基本原理的讲授中,已经注意到为这方面作一些准备(如卷积数值计算、拉普拉斯逆变换、快速傅里叶变换等)。

本书由郑君里同志主编。第三、八章由杨为理同志执笔,第十一章由应启珩同志执笔、其余各章由郑君里同志执笔。乐正友同志整理习题答案,张尊桥同志绘制插图。

常迥教授指导本书编写工作。冯重熙副教授对本书编写大纲的拟定提出宝贵意见。系负责同志以及通信、线路等教研组的有关同志对本书编写工作给予许多支持和帮助。

书稿承高等学校理科及工科基础课程教材编审委员会电路理论及信号分析小组委托南京工学院管致中教授、合肥工业大学芮坤生教授、北京工业学院李瀚荪副教授负责审阅,提出许多宝贵意见。作者在此表示衷心的感谢。

限于水平,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

一九八一年元月

于清华大学无线电电子学系

目 录

第一章 绪论	1
1.1 信号与系统	1
1.2 信号的描述、分类和典型示例	4
1.3 信号的运算	11
1.4 阶跃信号与冲激信号	15
1.5 信号的分解	25
1.6 系统模型及其分类	30
1.7 线性时不变系统	35
1.8 LTI 系统分析方法、本书概貌	37
习题	40
第二章 连续时间系统的时域分析	45
2.1 引言	45
2.2 系统数学模型(微分方程)的建立	47
2.3 用时域经典法求解微分方程	50
2.4 起始点的跳变——从 0_- 到 0_+ 状态的转换	56
2.5 零输入响应与零状态响应	60
2.6 冲激响应与阶跃响应	64
2.7 卷积	68
2.8 卷积的性质	74
2.9 利用卷积分析通信系统多径失真的消除方法	79
2.10 用算子符号表示微分方程	82
习题	86
第三章 傅里叶变换	93
3.1 引言	93
3.2 周期信号的傅里叶级数分析	94
3.3 典型周期信号的傅里叶级数	106
3.4 傅里叶变换	114
3.5 典型非周期信号的傅里叶变换	118
3.6 冲激函数和阶跃函数的傅里叶变换	124
3.7 傅里叶变换的基本性质	127
3.8 卷积特性(卷积定理)	143

3.9 周期信号的傅里叶变换	148
3.10 抽样信号的傅里叶变换	155
3.11 抽样定理	162
3.12 雷达测距原理、雷达信号的频谱	165
习题	170
第四章 拉普拉斯变换、连续时间系统的 s 域分析	184
4.1 引言	184
4.2 拉普拉斯变换的定义、收敛域	185
4.3 拉普拉斯变换的基本性质	192
4.4 拉普拉斯逆变换	201
4.5 用拉普拉斯变换法分析电路、 s 域元件模型	207
4.6 系统函数(网络函数) $H(s)$	214
4.7 由系统函数零、极点分布决定时域特性	219
4.8 由系统函数零、极点分布决定频响特性	228
4.9 二阶谐振系统的 s 平面分析	235
4.10 全通函数与最小相移函数的零、极点分布	243
4.11 线性系统的稳定性	248
4.12 双边拉普拉斯变换	253
4.13 拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系	257
习题	261
第五章 傅里叶变换应用于通信系统——滤波、调制与抽样	277
5.1 引言	277
5.2 利用系统函数 $H(j\omega)$ 求响应	278
5.3 无失真传输	282
5.4 理想低通滤波器	286
5.5 系统的物理可实现性、佩利-维纳准则	292
5.6 利用希尔伯特变换研究系统函数的约束特性	295
5.7 调制与解调	297
5.8 带通滤波系统的运用	301
5.9 从抽样信号恢复连续时间信号	306
5.10 脉冲编码调制(PCM)	312
5.11 频分复用、时分复用、码速与带宽	315
5.12 对当代电信网络的初步认识	320
习题	325
第六章 信号的矢量空间分析	332
6.1 引言	332
6.2 信号矢量空间的基本概念	333
6.3 信号的正交函数分解	340

6.4 完备正交函数集、帕塞瓦尔定理	346
6.5 沃尔什函数	349
6.6 相关	358
6.7 能量谱和功率谱	366
6.8 信号通过线性系统的自相关函数、能量谱和功率谱分析	370
6.9 匹配滤波器	375
6.10 测不准(不定度)原理及其证明	380
6.11 码分复用、码分多址(CDMA)通信	383
习题	387
附录一 卷积表	391
附录二 常用周期信号的傅里叶级数表	392
附录三 常用信号的傅里叶变换表	396
习题答案	406
索引	423

第一章 绪 论

1.1 信号与系统

人们相互问讯、发布新闻、广播图像或传递数据,其目的都是要把某些消息借一定形式的信号传送出去。信号是消息的表现形式,消息则是信号的具体内容。

很久以来,人们曾寻求各种方法,以实现信号的传输。我国古代利用烽火传送边疆警报。此后希腊人也以火炬的位置表示字母符号。这种光信号的传输构成最原始的光通信系统。利用击鼓鸣金可以报送时刻或传达命令,这是声信号的传输。以后又出现了信鸽、旗语、驿站等传送消息的方法。然而,这些方法无论在距离、速度或可靠性与有效性方面仍然没有得到明显的改善。19 世纪初,人们开始研究如何利用电信号传送消息。1837 年莫尔斯(F.B.Morse)发明了电报,他用点、划、空适当组合的代码表示字母和数字,这种代码称为莫尔斯电码。1876 年贝尔(A.G.Bell)发明了电话,直接将声信号(语音)转变为电信号沿导线传送。19 世纪末,人们又致力于研究用电磁波传送无线电信号。为实现这一理想,赫兹(H.Hertz)、波波夫(A.C.Попов)、马可尼(G.Marconi)等人分别作出贡献。开始时,传输距离仅数百米,1901 年马可尼成功地实现了横渡大西洋的无线电通信。从此,传输电信号的通信方式得到广泛应用和迅速发展。如今,无线电信号的传输不仅能够飞越高山海洋,而且可以遍及全球并通向宇宙。例如,以卫星通信技术为基础构成的“全球定位系统”(Global Positioning System,缩写为 GPS)可以利用无线电信号的传输,测定地球表面和周围空间任意目标的位置,其精度可达数十米之内。而个人通信技术的发展前景指出:无论任何人在任何时候和任何地方都能够和世界上其他人进行通信。人们利用手持通信机,以个人相应的电话号码呼叫或被呼叫,进行语音、图像、数据等各种信号的传输。

必须指出,现代通信系统的通信方式往往不是任意两点之间信号的直接传输,而是要利用某些集中转接设施组成复杂的信息网络,经所谓“交换”的功能以实现任意两点之间的信号传输。

信息网络技术的发展前景是实现所谓“全球通信网”,它意味着世界上所有通信网将形成智能化的统一整体,即全球一网。这将克服信号传输距离、时

间、语言等方面的各种障碍,与个人通信技术相结合构成无所不在的全球个人通信网。

目前,迅速发展的因特网(Internet)、电信业务领域的各种有线网或无线网以及广播电视网都已成为我们日常生活中不可或缺的重要组成部分。在我国以上三网融合的工程实现已经提到议事日程。建立“全球通信网”的目标指日可待。当今时代的重要特征是社会信息化,而信息化与网络化密不可分。我们将在本书第五章对电信网络、三网融合以及全球通信网等概念做初步介绍。

随着信号传输、信号交换理论与应用的发展,同时出现了所谓“信号处理”的新课题。什么是信号处理?这可以理解为对信号进行某种加工或变换。加工或变换的目的是:削弱信号中的多余内容;滤除混杂的噪声和干扰;或者是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。20世纪80年代以来,由于高速数字计算机的运用,大大促进了信号处理研究的发展。而信号处理的应用已遍及许多科学技术领域。例如,从月球探测器发来的各种测试数据或月面图形信号可能被淹没在噪声之中,但是,利用信号处理技术就可予以修复或增强,从而在地球上得到可靠的数据或清晰的图像。2010年10月,我国探月工程“嫦娥2号”采用清华大学宇航技术研究中心研制的遥测信道编码技术传送探测信号,取得圆满成功。此外,石油勘探、地震测量以及核试验监测中所得数据的分析都依赖于信号处理技术的应用。在心电图、脑电图分析、语音识别与合成、图像数据压缩、工业生产自动控制(如化学过程控制)以及经济形势预测(如股票市场分析)等各种科学技术领域中都广泛采用信号处理技术。

信号传输、信号交换和信号处理相互密切联系(也可认为交换是属于传输的组成部分),又各自形成了相对独立的学科体系。它们共同的理论基础之一是研究信号的基本性能(进行信号分析),包括信号的描述、分解、变换、检测、特征提取以及为适应指定要求而进行信号设计。本书各章节的分析与讨论正是为学习这些知识打好基础,特别注重数学分析与工程应用的密切联系。

“系统”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。

在信息科学与技术领域中,常常利用通信系统、控制系统和计算机系统进行信号的传输、交换与处理。实际上,往往需要将多种系统共同组成一个综合性的复杂整体,例如宇宙航行系统。

通常,组成通信、控制和计算机系统的主要部件中包括大量的、多种类型的电路。电路也称电网络或网络。

信号、电路(网络)与系统之间有着十分密切的联系。离开了信号,电路与系统将失去意义。信号作为待传输消息的表现形式,可以看作运载消息的工具,而电路或系统则是为传送信号或对信号进行加工处理而构成的某种组合。研究系