

国外电子与通信教材系列

MATLAB Oriented

信号与系统

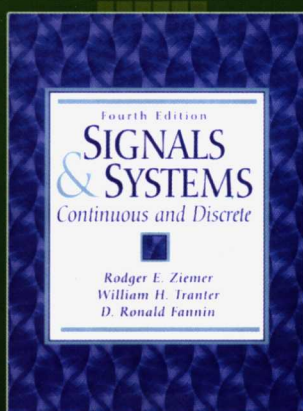
—— 连续与离散

(第四版)

Signals and Systems

Continuous and Discrete

Fourth Edition



Rodger E. Ziemer
[美] William H. Tranter 著
D. Ronald Fannin

肖志涛 等译
滕建辅 审校

PEARSON
Prentice
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

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

国外电子与通信教材系列

信号与系统

——连续与离散

(第四版)

Signals and Systems

Continuous and Discrete

Fourth Edition

Rodger E. Ziemer

[美] William H. Tranter 著

D. Ronald Fannin

肖志涛 等译

滕建辅 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书讨论了信号与系统分析的基本理论、基本分析方法及其应用。本书与前一版的主要区别在于本书含有大量利用 MATLAB 实现的例题,并在章末增加了许多使用计算机辅助解决的习题,便于读者实践。在内容的组织上,前 7 章讨论了时域和频域的连续时间线性系统,并在适当的地方给出了与离散时间信号与系统的对照,以便使读者能更好地理解离散时间和连续时间信号与系统之间的关系。此外,书中还介绍了可变状态的技术以及连续时间和离散时间状态方程。其余各章则讨论了离散时间系统,包括 z 变换分析方法、数字滤波分析与合成,以及离散傅里叶变换算法。第 9 章还加入了一个新的小节,讲述计算机辅助滤波器设计。

本书的读者应具有微分方程和电路理论的基本知识。此外,矩阵代数学的基本概念也有助于本书的学习。本书非常适合作为高等院校通信、电子、信息和计算机专业本科高年级或研究生低年级学生的教材。

Simplified Chinese edition Copyright © 2005 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Signals and Systems: Continuous and Discrete, Fourth Edition, ISBN: 013496456X by Rodger E. Ziemer, William H. Tranter, D. Ronald Fannin. Copyright © 1998.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和 Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education 培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-0583

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统——连续与离散 (第四版) / (美) 齐默 (Ziemer, R. E.) 著; 肖志涛等译.

北京: 电子工业出版社, 2005.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Signals and Systems: Continuous and Discrete, Fourth Edition

ISBN 7-121-00609-X

I. 信... II. ①齐... ②肖... III. 信号系统-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 124246 号

责任编辑: 贺瑞君

印 刷: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 34.75 字数: 902 千字

印 次: 2005 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zhts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

前 言

《信号与系统——连续与离散》第四版保留了前一个版本的组织结构,强调系统方法,从而给读者提供了理解和分析连续时间与离散时间线性系统的工具和方法。系统方法适合于分析多种类型的问题,本书包含了大量基于传统电路的例题,以阐述各种系统分析方法。

该版与前一版最明显的区别是,该版使用 MATLAB 辅助计算工具来求解许多章内例题和章末新增的习题和练习。本书选择 MATLAB 作为计算机工具的原因很明显,过去的几年里,工程课程中广泛使用 MATLAB,并且许多课程也引入了 MATLAB。MATLAB 提供了强大的运算和画图功能, MATLAB 代码也很精炼,因此,有可能用少量的代码描述复杂的过程。许多工具箱可以为研究各个领域中的问题提供必要的支持。因此,一旦读者熟练地掌握了作为运算和可视化工具的 MATLAB 的使用方法,必将在今后的研究工作中受益匪浅。对于这些应用,基于 Windows 的学生版 MATLAB 很廉价,但是内容丰富,非常实用。本书中的所有程序都可以在第五版的学生版 MATLAB 中运行。

我们在开发本书中的 MATLAB 例题、习题和计算机练习时,考虑了两个因素。首先,我们深信,让读者以不同的方法解决问题,从不同的角度考虑问题,有利于使用计算机辅助学习。同时,读者仍需要掌握基本的分析和综合技术,从而就要使用传统方法(比如铅笔和纸)解大量习题。因此,我们将 MATLAB 作为章内例题和习题的“补充”,而没有完全替代传统方法。教师在使用本书时,不必局限于 MATLAB。在这种情况下,对 MATLAB 应用感兴趣的读者可以将其作为自学内容。当然,我们鼓励读者用 MATLAB 解题。章末习题一般都没有指定使用 MATLAB 或其他工具解题,每章末专门安排了“计算机练习”部分。大部分练习都扩展了书本内容,给读者提供在解题时发挥创造力的机会。

我们所考虑的第二个因素就是要尽量保持简单。如前所述, MATLAB 是一种非常精炼的语言,这就可以用一行代码实现多个运算,而这些运算的代码一般需要花费很大精力才能弄明白,因此,我们避开了复杂的陈述和数据结构。另外,也避免了使用图形用户界面。因此,本书包含的程序代码可能不是最优的,但是我们希望它容易理解。在这里,读者的主要精力应该放在理解信号与系统理论的基本概念上,而不应该在编写代码或理解代码上花费太多时间。

本书使用的全部 MATLAB 文件(.m 文件)可以从电子工业出版社网站上打包下载,地址为 <http://www.phei.com.cn/download/matlab.rar>。

本版的另一个特点是所有的章末小结都是章中要点的逐点回顾,这对读者的学习非常有帮助。另外,第四版中增加了一些新的习题。

第四版的组织结构与第三版相同。前 7 章在时域和频域讲述连续时间线性系统,并适当引入了离散时间信号与系统知识,使读者了解离散时间和连续时间信号与系统之间的关系。时域分析中讨论的主要工具是卷积积分,频域分析的主要方法有傅里叶变换和拉普拉斯变换。在讲述连续时间和离散时间状态方程时还初步介绍了状态变量法。本书的其他部分介绍离散时间系统,包括 z 变换分析法、数字滤波器分析与综合、离散傅里叶变换和快速傅里叶变换

(FFT)算法。第9章中新增了计算机辅助数字滤波器设计一节。

这种组织结构使本书适合作为两门课的教程,每周讲授三学时,第一门课程主要介绍连续时间信号与系统,第二门课程则讲述离散时间信号与系统。或者将本书的内容分成三门季度课程进行介绍,即第一门课包含连续时间系统的时域和频域分析;第二门课涉及状态变量、采样,以及 z 变换和离散时间系统;第三门课主要讲述数字滤波器的分析与综合,并简要介绍数字滤波器的离散分析与设计以及离散傅里叶变换及其应用。当然也可以采用其他的内容组织方式。

本书假定读者已具备了微分方程的数学知识和一般电路理论知识,熟悉矩阵代数基本概念将有助于本课程的学习,但并不是必需的。本书的附录将第6章和第7章中用到的有关矩阵关系集中在了一起。

内容安排

本书首先介绍信号与系统模型和系统分类的基本概念。为了让读者尽早同时在时域和频域中考虑问题,第1章就引入了用频谱描述周期信号的思想。

第2章讲述卷积积分及其使用叠加原理在线性时不变系统分析中的应用,论述时域中的系统模型和系统分析。通过例题详细分析了卷积积分的求解,以巩固基本概念,还讨论了冲激响应的计算及其与阶跃响应和斜升(ramp)响应之间的关系,以及系统模型和系统仿真的概念。最后讨论了如何用SIMULINK求系统方程的数值解。

第3章介绍傅里叶级数。强调了用三角级数逼近周期函数以及利用正弦和余弦的正交性得到展开系数的基本方法。这样做是因为这是许多读者首次接触傅里叶级数。为满足某些读者的要求,在章末单独给出了另一种广义正交函数方法。针对信号失真,讨论了用系统的正弦信号稳态响应表示传递函数(transfer function)的概念。

傅里叶变换是第4章的主要内容,第4章同时讲述了它在频域中进行频谱分析和系统分析的应用。受无失真传输思想的启发,这里还介绍了理想滤波器的概念。本章还讨论了傅里叶系数的吉布斯现象、窗函数和收敛特性。另外,授课教师可以将本章介绍的DFT作为选讲内容。

第5章介绍拉普拉斯变换及其性质。虽然本书附录C中给出了复变函数理论的小结,以满足教师对学生的不同要求,但考虑到大多数读者是第一次接触这些内容,我们尽可能使本章中讲解的内容简单易懂。本章举例说明了从基本变换对推导拉普拉斯变换的方法,也就是用部分分式展开求拉普拉斯反变换的方法。作为选讲内容,本章还介绍了通过复数反演积分计算拉普拉斯反变换的方法,并简单介绍了双边拉普拉斯变换等内容。

第6章详细讨论了拉普拉斯变换在网络分析中的应用。介绍了用观察法写出拉普拉斯变换网络方程的方法,用来帮助读者复习在先修的电路课程中学习过的阻抗和导纳矩阵思想。讨论了零状态响应和零输入响应概念及其与瞬态响应和稳态响应之间的关系;详细分析了传递函数,并介绍了判断稳定性的罗斯判据;最后分析了线性时不变系统的波特图和框图算法。

第7章介绍了状态变量概念和用于系统分析的状态变量法。同时用时域方法和拉普拉斯变换法求解状态方程,分析了解的重要特性,并用实例说明了如何在电路分析中应用状态变量法。最后简要介绍了离散时间状态方程以及可控性和可观测性的概念。

最后三章讲述离散时间信号与系统分析。第8章从采样理论和对离散时间系统的表示方法开始进行研究,首先通过对模/数(A/D)转换器模型的分析,详细讨论采样过程,以便更直观地理解量化的物理意义。我们简单分析了在A/D转换过程中采样数据的量化效应,从而引入

了量化误差。这样,读者就具备了选择适当字长 A/D 转换器的基础知识。本章还详细讲述了从采样序列重构信号的理想方法和近似方法。为了能够解决问题,这里认真讨论了 z 变换、差分方程和离散时间传递函数,而没有使用围线积分。离散时间系统分类的讲述方法使用了与连续时间系统对应的讲述方法。

在第 9 章,读者可以利用离散时间分析方法的知识来解决一类重要且有意思的问题。我们介绍了与系统分析相对应的系统综合的思想。这里对离散时间积分的讲解特别详细,这样做有以下几个原因:首先,读者一般对积分很熟悉,这样,读者可以比较在频域分析和时域分析中获得的不同信息。其次,积分器作为一个基本模块出现在许多模拟系统中。最后,梯形积分与双线性 z 变换之间的关系对于讨论梯形积分特别重要。本章介绍的数字滤波器的设计方法都是标准方法,即时域不变性设计法、双线性 z 变换设计法及通过傅里叶级数展开的设计法。通过应用这些方法,读者可以更好地理解前面介绍的各种理论知识。由于有些设计方法要用到模拟滤波器原型知识,我们在附录 E 中讨论了几种不同的滤波器原型。本章还包括计算机辅助数字滤波器设计,这在本书以前的版本中没有出现过。

第 10 章主要讲述离散傅里叶变换(DFT)及其利用快速傅里叶变换(FFT)算法的实现。介绍了时域抽取算法和频域抽取算法。为了让读者具体实现 FFT 运算,本章给出了几个例题。我们认为,这样可以引导读者最大限度地理解 FFT 算法及其功能。本章总结了 DFT 的基本特性,并对 FFT 与 DFT 的运算次数进行比较,总结了 DFT 的几个应用,并讨论了窗函数在抑制泄漏中的使用。本章最后讨论了任意基的 FFT 算法和 Chirp- z 变换。

本书还包括一些标有“*”的选讲内容,这些内容往往比较深入。跳过这些内容并不影响本书的连续性。

致谢

我们要感谢很多人,他们都有意无意地为本书的编写做出了贡献。特别感谢我们的许多学生,给我们提供了试讲本书内容的机会,他们的意见和建议非常有价值,对本书的编写起了很大作用。还要特别感谢我们的很多同事,讲授了本书的第一、二版,提出了许多改进意见。还要感谢审校人,为第四版的改进提供了许多建设性的意见和建议。

第四版的审校人有:

Ronald H. Brown, 马凯特(Marquette)大学。

Malur K. Sundareshan, 亚利桑那(Arizona)大学图森(Tucson)分校。

我们还非常感激那些全部或部分审校了以前版本的审校人,感谢他们对我们工作的帮助。

最后,我们要感谢我们各自的妻子,Sand、Judy 和 Sara,以及我们的家庭在我们为本书的第四版努力工作时给予的理解和支持。他们现在都已习惯了我们的无休止的编写工作。

R. E. Z.

W. H. T.

D. R. F.

目 录

第 1 章 信号与系统建模的概念	1
1.1 引言	1
1.2 系统举例	1
1.3 信号模型	7
1.4 能量信号与功率信号	25
1.5 能量谱密度与功率谱密度	26
1.6 用 MATLAB 进行信号分析	28
第 2 章 系统建模与时域分析	41
2.1 引言	41
2.2 系统建模的概念	41
2.3 线性时不变系统的叠加积分	48
2.4 卷积积分计算举例	52
2.5 线性时不变系统的冲激响应	57
2.6 利用阶跃响应求叠加积分	60
2.7 线性时不变系统的频率响应函数	64
2.8 线性系统的稳定性	66
2.9 系统建模和仿真	67
第 3 章 傅里叶级数	87
3.1 引言	87
3.2 三角级数	87
3.3 周期信号的三角傅里叶级数表示	90
3.4 复指数傅里叶级数	96
3.5 傅里叶系数的对称性	102
3.6 帕塞瓦尔(Parseval)定理	104
3.7 线谱	106
3.8 线性时不变系统对周期信号的稳态响应:无失真系统	108
* 3.9 傅里叶谱的收敛速率	115
* 3.10 傅里叶级数和信号空间	117
第 4 章 傅里叶变换及其应用	129
4.1 引言	129
4.2 傅里叶积分	129
4.3 能量谱密度	132

4.4	极限傅里叶变换	135
4.5	傅里叶变换定理	135
4.6	用傅里叶变换进行系统分析	148
4.7	利用傅里叶变换求正弦信号的系统稳态响应	152
4.8	理想滤波器	153
4.9	带宽和上升时间	155
* 4.10	窗函数和吉布斯现象	156
* 4.11	周期信号的傅里叶变换	160
* 4.12	希尔伯特变换的应用	162
* 4.13	离散傅里叶变换	163
第 5 章	拉普拉斯变换	177
5.1	引言	177
5.2	求解拉普拉斯变换举例	178
5.3	拉普拉斯变换的几个定理	181
5.4	有理函数的逆	191
* 5.5	反演积分及其在拉普拉斯反变换中的应用	201
* 5.6	双边拉普拉斯变换	204
第 6 章	拉普拉斯变换的应用	217
6.1	引言	217
6.2	利用拉普拉斯变换进行网络分析	217
6.3	用拉普拉斯变换进行电路的回路分析和节点分析	228
6.4	传递函数	235
6.5	稳定性与罗斯阵列	240
6.6	频率响应和波特图	245
6.7	系统框图	252
* 6.8	反馈电路的基本元件——运算放大器	258
第 7 章	状态变量分析法	274
7.1	引言	274
7.2	状态变量的概念	274
7.3	状态方程的形式	275
7.4	状态方程的时域解	278
7.5	状态方程的频域解	281
7.6	求状态转移矩阵	282
7.7	电网络的状态方程	290
7.8	从传递函数求状态方程	294
* 7.9	离散时间系统的状态方程	299
第 8 章	离散时间信号与系统	308
8.1	引言	308

8.2 模/数转换	308
8.3 z 变换	323
8.4 差分方程与离散时间系统	336
8.5 离散时间系统举例	348
* 8.6 利用反演积分求 z 反变换	350
第 9 章 数字滤波器的分析与设计	365
9.1 引言	365
9.2 数字处理器的结构	365
9.3 离散时间积分	372
9.4 无限冲激响应滤波器设计	376
9.5 有限冲激响应数字滤波器设计	395
9.6 数字滤波器的计算机辅助设计	409
第 10 章 离散傅里叶变换和快速傅里叶变换算法	426
10.1 引言	426
10.2 DFT 与指数傅里叶级数比较: DFT 的误差源	426
10.3 DFT 计算举例	431
10.4 FFT 的数学推导	436
10.5 DFT 的性质	443
10.6 FFT 的应用	449
10.7 窗函数及其特性	457
10.8 利用 DFT 进行信号处理时的参数选择	462
* 10.9 Chirp- z 变换	463
附录 A 使用 MATLAB 的说明与提示	475
附录 B 列写集总参数系统基本方程的系统化方法	480
附录 C 复变函数中的重要定义和定理	498
附录 D 矩阵代数	505
附录 E 模拟滤波器	509
附录 F 数学查找表	533
附录 G 部分习题参考答案	535

第1章 信号与系统建模的概念

1.1 引言

本书讨论系统和系统中信号的相互作用。从一般意义上讲,系统是一个由若干组件相互连接组合而成、用来达到某特定目的的有机整体^①。这里的目的是火箭加速度的测量或从纽约到洛杉矶的信息传输。加速度的测量可以通过在不同时间观测其位置得出,信息传输的一个简单解决方案是使用马和骑士。显然,还可以用其他更复杂的、也许是更好的方法。然而,需要注意的是,这里的定义是非常通用的,可以涵盖所有这些系统。

我们主要讨论线性系统。这样的限制是合理的,因为许多工程上的系统都非常接近于线性系统,并且已经存在大量可用于线性系统分析的功能强大的技术方法。本书要讨论分析线性系统的几种方法。虽然这里介绍的方法都是通用的,但并不是所有方法对于解决所有具体问题都同样方便。因此,我们尽量指出每种方法的具体应用。

信号,可以看做是描述与系统相关的我们感兴趣的物理量的时间函数。在电气系统中,信号常用来表示电流和电压,而在机械系统中,信号可以表示力和速度(或位置)^②。在上面提到的例子中,我们感兴趣的信号之一为加速度,但这可以归结为与速度成正比的信号。由于电压和电流比较容易处理,所以,在进一步处理信号之前,一般要将表示加速度的原始信号(机械信号)转换为电信号。下一节将举例说明。

正如有多种系统分析方法一样,信号描述和分析也有多种不同的方法。在特定情况下,并不是所有方法都同样方便,因此,在研究信号描述和系统分析方法的过程中,我们将给出这些方法的具体应用。

到目前为止,我们的讨论都是非常宽泛、通用的。为使引入的思想更加明确,我们将对已经提及的加速度测量和信息传递问题进行详细分析。

1.2 系统举例

例 1.1 图 1.1 给出了由在无摩擦滑动装置中放入用弹簧平衡的物体组成的加速度仪的示意图。它用来测量火箭的纵向加速度,其加速度曲线如图 1.2(a)所示。(a)如果用于指示加速度的物体的质量为 2 g,试确定弹簧的弹性系数 K ,使得物体在发射 $t = 72$ s 以后达到最大加速度 40 m/s^2 时离开平衡位置的距离为 1 cm。(b)如果可以测出的物体移动的最小改变量为 0.5 mm,那么对应的加速度的最小改变量是多少?(c)推导并画出火箭纵向速度分布曲线。

① 国际电气电子工程师协会(IEEE)词典将系统定义为“包括各种相互作用的结构的集成体”(an integrated whole even though composed of diverse, interacting structures or subjunctions)。

② 在更通用的意义下,信号可以是多个独立变量的函数,比如机翼表面上的压力为三个空间变量和时间的函数。

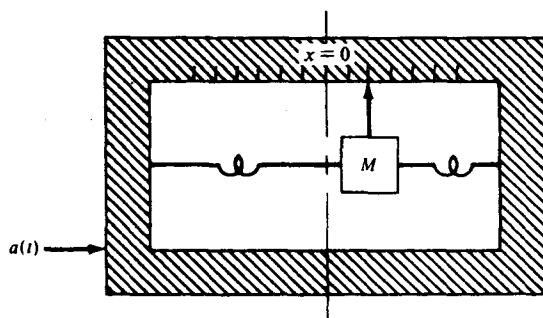
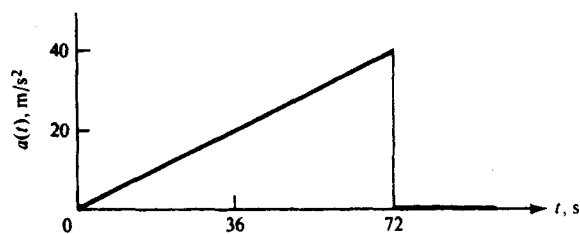
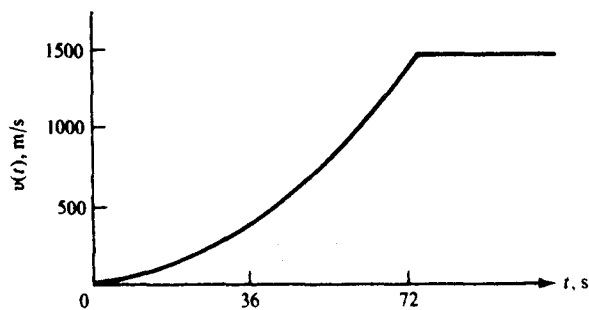


图 1.1 测量火箭加速度的系统



(a) 加速度曲线



(b) 速度曲线

图 1.2 火箭的加速度和速度曲线

解:

(a) 加速度在物体上产生的力 Ma 与由弹簧拉伸形成的力 Kx 相互平衡。这样

$$Ma = Kx \quad (1.1)$$

其中 x 为离开平衡位置 $x=0$ 的距离, M 为物体的质量, K 为弹簧系数, a 为火箭的加速度。解出 K , 可得

$$K = \frac{Ma_{\max}}{x_{\max}} = \frac{(0.002 \text{ kg})(40 \text{ m/s}^2)}{0.01 \text{ m}} = 8 \text{ kg/s}^2 \quad (1.2)$$

(b) 由 $\Delta x_{\min} = 0.5 \text{ mm} = 0.0005 \text{ m}$, 可得

$$\Delta a_{\min} = \frac{K \Delta x_{\min}}{M} = \frac{(8)(0.0005)}{0.002} = 2 \text{ m/s}^2 \quad (1.3)$$

(c) 当 $t > 0$ 时, 设加速度为时间函数, 表示为^①

$$a(t) = \begin{cases} \alpha t, & t \leq t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

其中, 在本例中, $t_0 = 72 \text{ s}$, $\alpha = 5/9 \text{ m/s}^3$ 。对 $a(t)$ 求积分可得速度, 即

$$v_r(t) = \begin{cases} \alpha t^2/2, & t \leq t_0 \\ \alpha t_0^2/2, & t > t_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

利用给出的 α 值, 火箭在 $t = t_0$ (熄火) 时的速度为

$$v_r(72) = \frac{5}{9} \frac{(72)^2}{2} = 1440 \text{ m/s} = 4724 \text{ ft/s} = 3221 \text{ mi/hr} \quad \text{②} \quad (1.6)$$

作为时间函数的速度如图 1.2(b) 所示。

例 1.2 为了利用前例中的加速度仪确定速度, 我们使用了运算放大器积分电路, 如图 1.3 所示。输入端的电位器滑动臂与加速度仪中的物体相连, 可提供 0.1 V 的最大输入电压, 这取决于加速度的正负。运算放大器为理想运算放大器 (输入阻抗和放大系数都为无穷大)。然而它的最大输出为 10 V 。选择 RC , 使得在火箭速度最大时运算放大器的输出不会过载 (假设 $R_p \ll R$)。

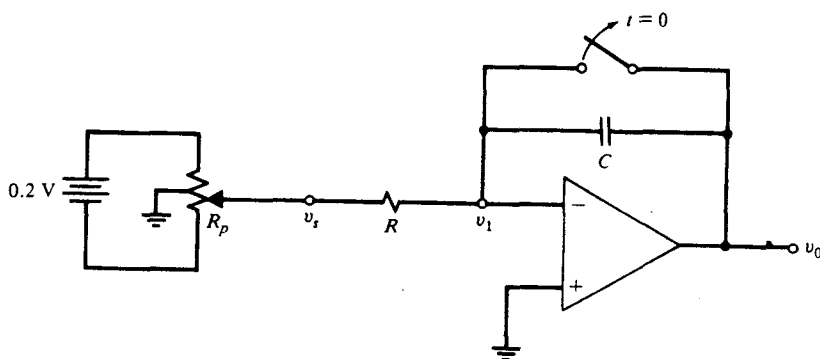


图 1.3 用例 1.1 中的加速度仪确定速度所用的积分电路

解:

在 R, C 和放大器输入的节点处, 由基尔霍夫电流定律有

$$\frac{v_1 - v_s}{R} + C \frac{d}{dt} (v_1 - v_0) = 0 \quad (1.7)$$

由于运算放大器放大系数无穷大, 反相和同相输入端的电压近似相等, 而同相输入端接地, 因此运算放大器反相输入端的电压 $v_1 \approx 0$ 。这样, 假设电容开始没有充电, 基尔霍夫电流方程可简化为

$$v_0(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_s(\lambda) d\lambda \quad (1.8)$$

① 但有个别例外。本章假设 $t < 0$ 时信号为 0。

② ft/s 指英尺/秒, mi/hr 指英里/小时, 1 英尺 = 0.3048 m, 1 英里 = 1.6093 km——编者注。

由前例可得电位器滑动臂处的电压为

$$v_s(t) = \beta t, \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (1.9)$$

其中 $v_s(t_0) = 0.1 \text{ V}$, 给定 $\beta = 0.1/72 \approx 1.4 \times 10^{-3} \text{ V/s}$ 。因此, 运算放大器在 t_0 时的输出电压为

$$v_o(t_0) = -\frac{1}{RC} \frac{\beta t_0^2}{2} \quad (1.10)$$

设该值为 -10 V , 这是运算放大器输出的最大值。解出 RC , 可得

$$RC = \frac{\beta t_0^2}{20} = \frac{(0.1/72)(72)^2}{20} = 0.36 \text{ s} \quad (1.11)$$

当 $R = 50 \text{ k}\Omega$ 时, $C = 7.2 \text{ }\mu\text{F}$ 。

例 1.3 求解前例(或此类问题中的任意信号处理函数)中积分运算的另一种方法, 是每 T 秒对模拟加速度信号的电压信号采样一次, 将采样结果量化, 表示成数值形式, 然后进行数值积分。第 8 章将指出, 如果信号是有限带宽的(后面将给出该术语的精确定义), 信号表达的所有信息都可以由采样频率足够高的采样值表示。矩形法则和梯形法则是两种简单的积分方法, 如图 1.4 所示。前者将曲线下的面积近似为一系列“方脉冲”或矩形面积之和, 可用下面的算法得到

$$\hat{v}[(n+1)T] = \hat{v}(nT) + Ta[(n+1)T] \quad (1.12)$$

其中 $\hat{v}(nT)$ 是采样时间为 nT 时速度的近似值, T 是采样间隔, $a(nT)$ 是采样时间为 nT 时的加速度。如果使用梯形积分法则, 曲线下的面积就约等于一系列邻接的宽为 $T(\text{s})$ 的梯形之和。这种情况下, 由加速度求速度的算法为

$$\hat{v}[(n+1)T] = \hat{v}(nT) + \{a(nT) + a[(n+1)T]\}(T/2) \quad (1.13)$$

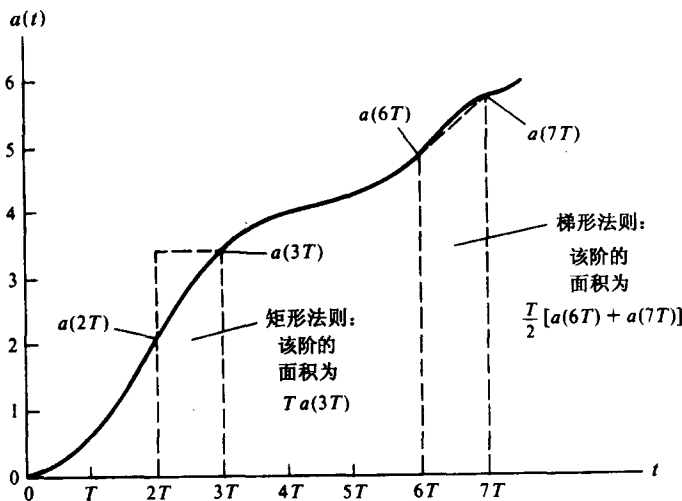


图 1.4 离散时间积分法则示意图

注意, 这些算法都是递归实现的, 即下一次速度的近似值由上一次速度的近似值加上加速度的采样值计算得到。列出 $n=0, 1, 2, \dots$ 的方程, 将 $n=0$ 的方程代入 $n=1$ 的方程, 然后将其结果再代入 $n=2$ 的方程, 继续下去, 这样就可以去掉递归结构。应用梯形法则时,

要使用加速度的两个采样值——当前的采样值及其前一个采样值。还需要注意的是,各种采样信号变量中的 T 可以去掉,符号 n 才是独立变量。第9章将详细讨论积分算法的有关问题。本例的最后列表给出了两种算法的结果,如表 1.1 所示。注意,对于如图 1.2 所示的加速度曲线,梯形法则的计算结果要精确一些。如果加速度曲线不是线性的,结果可能并非如此。

表 1.1 例 1.2 的数值结果

n	nT, s	$v(nT)$, 矩形	$v(nT)$, 梯形
0	0	0	0
1	4	8.9	4.4
2	8	26.7	17.8
3	12	53.3	40.0
4	16	88.9	71.1
5	20	133.3	111.1
6	24	186.7	160.0
7	28	248.9	217.8
8	32	320.0	284.4
9	36	400.0	360.0
10	40	488.9	444.4
11	44	586.7	537.8
12	48	693.3	640.0
13	52	808.9	751.1
14	56	933.3	871.1
15	60	1066.7	1000.0
16	64	1208.9	1137.8
17	68	1360.0	1284.4
18	72	1520.0	1440.0

任何系统分析或设计的起始点都是模型,无论怎样精心改进,它总是现实(物理)系统的理想化。因此,任何系统分析的结果都是事件真实状态的理想化。尽管如此,如果模型足够精确,得到的结果就可以足够精确地反映实际系统。

前面各例说明了系统的概念和达成预期目标的系统设计。每个例子都涉及到了信号的概念。在例 1.1 中,信号是用于测量加速度的物体的位移。将之与例 1.2 中的运算放大器系统相连就产生了电压信号,一个与加速度成正比,另一个与速度成正比。

前两个例子说明的另一个概念是子系统。分开来讲,每个都是一个系统,而将两者结合在一起时仍组成一个系统。在这种情况下,为避免混淆,我们将每一部分(这里分别是加速度仪和信号处理积分电路)称为子系统。第三个例子说明了数字信号处理的思想,本书将在后面对该概念进行讨论。

接下来再讨论一个与前三个例子有些区别的例子。本章的其余部分将介绍一些有用的信号模型。第2章讲述在时域中进行系统描述和分析的方法。本书后续部分将讨论信号与系统分析的其他方法。

例 1.4 通信链路 图 1.5 给出了一个可能存在的双向通信链路示意图,例如纽约和洛杉矶之间的通信链路。它可以完全由地面链路组成,比如电线和微波链路,还可能使用卫星中继站。无论使用何种机制,系统分析员必须确定实际系统应用中最重要几个部分并且用一个模型描述。