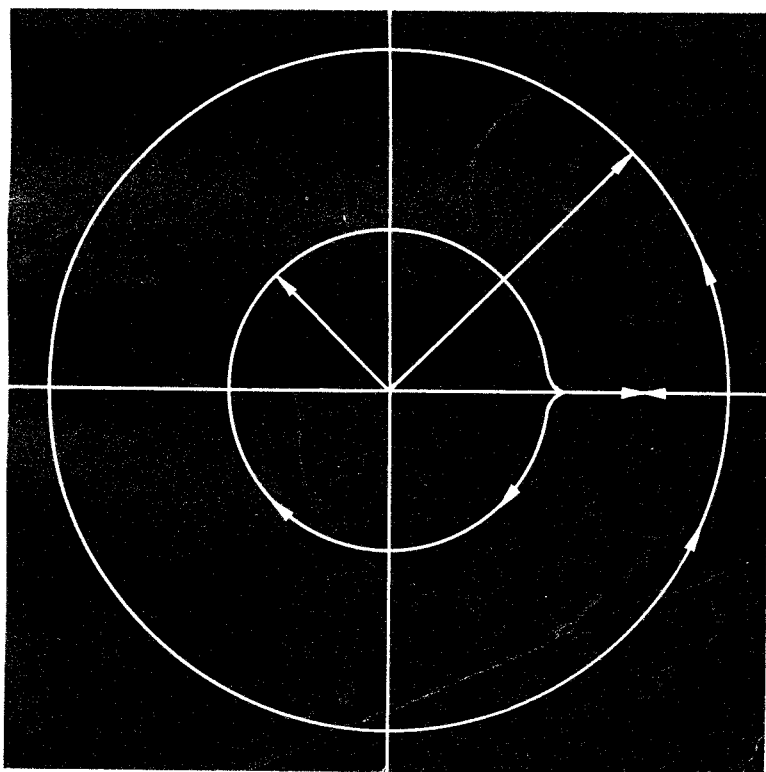


信号 系统与计算机

[美] P · M · 奇利安著
北京邮电学院数字通信教研室译



Signals, Systems and the Computer

Paul M. Chirlian

1973

内 容 提 要

本书主要讲述分析各种通信系统和信号处理所必须的数学分析理论方法,并介绍用 FORTRAN IV 语言编写计算机解题的程序。全书共十章:信号和系统概述—计算机用于信号和系统分析;分布理论,傅里叶变换和快速傅里叶变换;拉普拉斯变换;状态变量;线性、连续时间系统;离散时间系统;系统稳定性;统计过程—噪声;信号传输;分布系统。书末有:正交函数、复变函数、矩阵三个附录。

信号、系统与计算机

[美] P. M. 奇利安 著

北京邮电学院数字通信教研室译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/32 1981年5月第一版

印张: 25 12/32 页数: 406 1981年5月北京第一次印刷

字数: 584 千字 印数: 1—6,300 册

统一书号: 15045·总12494—有 5208

定价: 2.55 元

译者前言

这本书的主要对象是高等学校电信工程专业的高年级学生和研究生以及从事邮电通信工程方面工作的科技工作者。本书具有如下一些比较突出的特点。

首先，它给信号和系统下了简短确切的定义，对信号分析，特别是系统分析的基本概念和方法进行了比较全面的描述。

书中涉及的系统既包括线性的，也包括非线性的；既有时变的，又有时不变的；既有连续的，又有离散的。书中较全面地阐述了各种系统的性质和特点。

在系统分析方法方面不仅介绍了傅氏变换，快速傅氏变换，拉氏变换和 Z 变换，而且还讲述了用状态变量方程求解的方法来分析系统。这些方法对于包括邮电通信在内的国民经济各部门中从事数据通信，网络设计，通信理论等方面的研究工作者，工程技术人员都是很有用的。

这本书的第2个特点是从始至终，几乎每一章都引入了利用计算机语言FORTRAN IV编写程序解题的例子。不仅如此，还以离散傅氏变换和状态变量方程为例，初步讲述了数值分析和计算方法。

根据经验，进行信号和系统分析中的一个棘手问题是必须将相当大的精力和时间消耗在大量繁琐的计算工作中。电子计算机的出现提供了高效率，高精度的计算工具，使这个长期使人苦恼的棘手问题迎刃而解，正因为如此，作为电信工程方面研究工作者和工程技术人员有必要掌握计算机语言FORTRAN

IV, 善于用它编写程序在计算机上解决系统分析的问题。

除此, 本书对系统分析所必须的信息论和系统工程的基本概念和一些数学工具, 如概率论, 矩阵代数, 复变函数和正交函数等都作了初步介绍。

本书在编写和论述中, 文字比较简练, 条理性较强, 注意到由浅入深循序渐进, 这也是本书的一个特点。

根据以上所述, 我们认为这本书对我国电信工作者是有益处的, 是适合我国目前技术发展需要的, 这就是我们翻译这本书的原因。

本书由北京邮电学院数字通信教研室部分同志集体翻译。从第一章到第十章分别由许义祯、倪维桢、王钦笙、邓震垠、刘罗松、马自卫、陈灼新、李文海、刘符、李鹏飞同志译出。附录由刘瑞曾同志译出。全部译稿由王云枫、李文海、倪维桢同志校订。

原著在文字、公式、计算方面的一些错误我们已尽可能予以订正, 但可能还有不少遗漏之处, 欢迎读者指正。

译者

作者序言

本教科书可作为大学高年级或研究生的电工课教材。是基本网络理论课的后续课程。它给学生提供分析各种系统及其处理信号所必须的数学工具。书中的内容可以按照教师的要求加以取舍，以供学习一个或两个学期。

用数字计算机求解数学问题，可以大大减少分析中的困难。但是采用数字计算机，也需要全面了解分析原理，而分析原理正是本书的主要内容。此外，通过本书学生还能学会用FORTRAN IV编写解数学问题的计算机程序。

不过，本书不是计算机程序手册，因此不对每次要分析的问题提出计算机程序。而且由于本书不研究数值分析，所以不包括所有常用的数值分析。书中讨论使存储空间为最小的方法和许多程序的流程图。由于成批处理和分时操作的应用迅速增长，书中也包括了这方面的程序。

第一章讨论系统及其传输信号的一般概念。简要地介绍数字计算的基本概念。写出了直流回路分析程序并说明FORTRAN IV程序如何简化所遇到的最烦琐的问题。

第二章用分布理论导出傅里叶变换。对分布理论所进行的基本讨论可使不熟悉这门学科的学生也很容易学懂。运用这个理论可大大简化某些常用函数的傅里叶变换，并且能严格而又简单地处理例如单位脉冲及其导数等广义函数。还推导了傅里叶变换，讨论了它的基本特性。并把傅里叶级数作为傅里叶变换的特例加以处理。除此，还详细地讨论了快速傅里叶变换和实现它的计算机程序。还包括了卷积定理、吉布现象和仙农定

理。

第三章由傅里叶变换导出拉普拉斯变换并且运用了分布理论的概念。采用的是 0^- 而不是 0^+ 拉普拉斯变换，并且充分地讨论了在计算 $t=0$ 的脉冲响应时，采用这种变换有什么优越性。还研究了以拉普拉斯变换的基本定理和概念来求解微分方程。推导了拉普拉斯反变换，不过这部分内容可以省略。假定读者是熟悉复变函数的基本概念（附录 B 介绍这些材料）。本章也讨论了卷积定理和双边拉普拉斯变换。

第四章研究状态空间的基本原理并提供写出状态变量方程的方法。讨论线性，时不变，时变和非线性系统，给出求解状态变量方程的方法。详细介绍数值方法并给出求解的 FORTRAN IV 程序。

第五章将第二、三、四章的分析方法应用于线性连续时间系统。给出传递函数、脉冲响应和正弦稳态响应之间的关系。借助单位阶跃和单位脉冲响应，讨论任意信号的响应。研究因果系统。把希尔伯特变换和波德关系作为因果系统的结果导出。讨论低通和带通系统。此外，还研究系统响应边界和信号有效带宽的含义。

第六章研究离散时间系统，讨论差分方程，介绍状态变量方法。研究线性，时不变，时变和非线性系统。介绍包括用计算机求解这些方程的程序。讨论采用 z 变换求解线性、时不变系统。

第七章讨论系统稳定性。首先研究线性时不变系统。导出茹斯—霍尔维茨算法和奈奎斯特准则。然后研究一般（非线性）系统。讨论状态变量方法。详细地介绍李雅普诺夫稳定性。讨论可观察性和可控制性。也研究取样系统的稳定性。

第八章介绍概率的基本概念。研究随机信号和随机过程。

简要地推导中心极限定理。讨论频谱密度的基本概念。包括带通滤波器对噪声概率的影响。讨论相关函数和维纳—辛钦关系。讨论实现相关性的计算机程序和用相关性从噪声中提取信号。

第九章讨论信息传输，用信息论的基本概念研究信道容量。讨论编码的几个基本概念。研究在噪声信道上传输信号并从噪声中提取信号。讨论抗干扰码，而后介绍用连续滤波器从噪声中提取信号并讨论预测滤波器和因果滤波器。

第十章介绍分布系统并采用拉普拉斯变换推导和求解分布系统的偏微分方程。讨论特殊的和一般的传输线的瞬态响应。然后研究正弦稳态响应和驻波。讨论用史密斯圆图计算阻抗的方法。讨论短线匹配和实现它的计算机程序。

书末有三个附录，以便对其内容不熟悉的读者作为复习或说明材料。附录 A 讨论正交函数，附录 B 讨论基本复变理论，附录 C 包括矩阵和克雷—哈密顿定理。

目 录

译者前言.....	1
作者序言.....	3
第一章 信号和系统概述——数字计算机用于信号和 系统分析.....	1
1-1 系统的基本概念	1
1-2 信号的基本概念	5
1-3 用计算机求解信号和系统问题	6
1-4 用计算机求解联立方程	6
1-5 直流电路分析程序	19
习题.....	25
第二章 分布理论, 傅里叶变换, 快速傅里叶变换	29
2-1 分布理论概述	29
2-2 分布的性质	35
2-3 几个特定的分布	46
2-4 傅里叶变换	53
2-5 基本的吉布现象	59
2-6 傅里叶变换的实部和虚部——傅里叶变换的几例	63
2-7 用傅里叶变换计算瞬态响应的简要讨论	71
2-8 傅里叶变换的收敛性	76
2-9 几个特殊函数的傅里叶变换	81
2-10 傅里叶变换的基本定理.....	85
2-11 卷积定理.....	93

2-12	能量——帕斯维定理.....	98
2-13	带宽受限信号——进一步讨论吉布现象。吉布现象的消除.....	101
2-14	傅里叶变换的最小二乘方误差性.....	107
2-15	傅里叶级数.....	113
2-16	普阿松求和公式.....	120
2-17	仙农取样定理.....	123
2-18	数值积分.....	128
2-19	数值计算——离散傅里叶变换——二进制系统.....	134
2-20	快速傅里叶变换	145
	习题.....	163
第三章	拉普拉斯变换.....	171
3-1	利用傅里叶变换推导单边拉普拉斯变换	171
3-2	几种常用时间函数的拉普拉斯变换	176
3-3	拉普拉斯变换的解析性	179
3-4	拉普拉斯变换和傅里叶变换的关系	182
3-5	导数和积分的拉普拉斯变换——常系数线性微分方程的解	187
3-6	利用拉普拉斯变换计算瞬态响应的简要讨论。说明采用 0^- 而不采用 0^+ 的优越性.....	193
3-7	拉普拉斯变换的几个基本定理	196
3-8	单边周期(半周期)函数	198
3-9	初值定理	200
3-10	终值定理.....	204
3-11	拉普拉斯反变换——约当引理.....	206
3-12	计算具有支点的 $F(s)$ 的拉普拉斯反变	

换.....	220
3-13 拉普拉斯反变换积分中计算留数的计算机 程序——几个多项式处理.....	227
3-14 卷积定理.....	232
3-15 双边(双向)拉普拉斯变换.....	238
习题.....	244
第四章 状态变量.....	249
4-1 状态、状态方程、状态空间和轨迹概述	249
4-2 系统的基本状态变量方程	255
4-3 电网络的状态变量方程	265
4-4 时变系统的状态变量方程	278
4-5 非线性系统的状态变量方程	281
4-6 线性、时变系统状态变量方程的解法——状 态转移矩阵	286
4-7 用拉普拉斯变换求解线性、时不变系统的状态变 量方程	297
4-8 求解线性、非线性、时不变和时变系统的状态 变量方程的数值方法	299
4-9 求解线性、非线性、时不变和时变系统的状态 变量方程的计算机程序	304
4-10 状态变量和其它微分方程的框图表示 法.....	311
习题.....	316
第五章 线性, 连续时间系统.....	322
5-1 线性系统响应, 传递函数、脉冲响应和正弦稳 态响应的关系——利用传递函数表示状态变 量特性	322

5-2	单位脉冲和单位阶跃响应	332
5-3	单位脉冲响应, 单位阶跃响应和对任意信号的响应 之间的关系	342
5-4	因果系统	344
5-5	希尔伯特变换	345
5-6	波德关系式——最小相移函数	353
5-7	电阻积分定理	361
5-8	低通系统	363
5-9	带通系统——等效低通系统	368
5-10	系统响应的界限	373
5-11	信号的有效带宽	381
5-12	多输入多输出系统的响应	385
	习题	387
第六章	离散时间系统	392
6-1	差分方程	393
6-2	离散时间系统的基本状态变量方程组	398
6-3	时变离散时间系统的状态变量方程	403
6-4	非线性离散时间系统的基本状态变量方 程	405
6-5	线性、非线性、时变、时不变系统和非线性离散时 间系统状态变量方程的求解	405
6-6	用计算机解线性、非线性、时不变和时变离 散时间系统状态变量方程	408
6-7	z 变换	411
6-8	用 z 变换解差分方程	420
6-9	用 z 变换解线性时不变离散时间系统状态 变量方程	423

6-10	应用于 z 变换的卷积定理	424
6-11	离散时间系统响应——传递函数	428
	习题	438
第七章	系统稳定性	443
7-1	线性时不变系统稳定性的一般讨论	444
7-2	茹斯——霍尔维茨算法	453
7-3	奈奎斯特准则	470
7-4	采用状态变量的系统稳定性	481
7-5	线性系统的可观察性和可控制性	491
7-6	李亚普诺夫稳定性准则	497
7-7	用计算机研究不稳定性	506
7-8	取样系统的稳定性	508
	习题	516
第八章	统计过程——噪声	522
8-1	概率的几个基本概念	523
8-2	随机信号	533
8-3	随机过程	549
8-4	常用的概率密度和概率分布——中心极限定理	553
8-5	噪声频谱密度	563
8-6	滤波噪声	568
8-7	相关函数	578
8-8	自相关函数与频谱密度的关系——维纳-辛钦定理	588
8-9	有噪声时用相关函数检测信号——基本噪声滤波	591
	习题	597

第九章 信号传输	603
9-1 信号的信息量——熵	603
9-2 信道容量	611
9-3 编码	617
9-4 噪声信道上的信息传输-抗干扰编码	626
9-5 噪声信道的信道容量	634
9-6 用滤波器从噪声中提取信号	636
习题	650
第十章 分布系统	653
10-1 传输线中电压与电流的关系	654
10-2 传输线的瞬时响应——无失真传输——RC 传输线——一般传输线	665
10-3 传输线的正弦稳态响应	687
10-4 无损耗传输线——驻波	688
10-5 传输线的阻抗和导纳——史密斯圆图	699
10-6 阻抗匹配——短截线的使用——史密斯圆图算法——计算机算法	710
习题	719
附录 A 正交函数	724
A-1 正交函数	724
附录 B 复变函数	732
B-1 复变函数	732
B-2 极限, 连续性, 导数	735
B-3 解析函数——柯西——黎曼方程	738
B-4 奇点	741
B-5 线积分	745
B-6 柯西积分定理	748

B-7	柯西积分公式·····	751
B-8	泰勒级数——劳伦级数·····	752
B-9	用留数计算围线积分·····	758
附录 C	矩阵·····	765
C-1	矩阵代数·····	765
C-2	联立方程的矩阵表示法—逆矩阵·····	769
C-3	特征值和特征矢量——对角线形式·····	772
C-4	克雷——哈密顿定理·····	777
索引	·····	784

第一章 信号和系统概述——数字 计算机用于信号和系统分析

本书要研究系统和信号分析。把系统定义为**实现某种特定要求的装置的集合**。系统可以很简单，也可以非常复杂。一个由电池、开关、灯泡、反射镜组成的闪光灯，可以看作是一个系统。一个包括发射机、接收机、卫星、计算机和天线的卫星通信电路可看作是一个系统。一个电网络也可以看作是一个系统。所以系统复杂程度的差别可以非常大。

我们所研究的系统对输入都会产生响应。这些输入及系统的响应，或输出，都称为**信号**。在所讨论的通信系统中，其输入信号可以来自传声器，输出信号声音可以来自喇叭。一个复杂的系统可以假设是由许多部分组成的，而其中每一部分，通常又可以作为一个系统来对待。由于信号和系统有许多定义，所以，通常用数学方法将它们进行分类。

数字计算机常用来分析系统以避免烦琐的计算。因此，要讨论能够实现分析过程的计算机程序。某些分析方法本身就适于用计算机求解，而另一些则不行。但由于它们通常都有助于进一步了解系统的工作，所以都是重要的。

1-1 系统的基本概念

许多系统可以用一组表示输入和输出信号关系的方程来描述。通常这些方程都是微分方程。例如，在图 1-1 方框描述的系统， $y_1, y_2, y_3, \dots, y_k$ 是 k 个输入， $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是 n



图 1-1 有 k 个输入 n 个输出的系统方框图

个输出，它们都是时间函数。再如，在电网络中， $y(k)$ 可以是电压源，而 $x(k)$ 是回路电流。如果系统是线性的，表征这个系统的微分方程可以是

$$\begin{aligned}
 a_{1m} \frac{d^m x_1(t)}{dt^m} + \cdots + a_{11} \frac{dx_1(t)}{dt} + a_{10} x_1(t) &= \\
 &= F_1[y_1(t), y_2(t) \cdots y_k(t)] \\
 a_{2m} \frac{d^m x_2(t)}{dt^m} + \cdots + a_{21} \frac{dx_2(t)}{dt} + a_{20} x_2(t) &= \\
 &= F_2[y_1(t), y_2(t) \cdots y_k(t)] \\
 &\dots\dots\dots \\
 a_{nm} \frac{d^m x_n(t)}{dt^m} + \cdots + a_{n1} \frac{dx_n(t)}{dt} + a_{n0} x_n(t) &= \\
 &= F_n[y_1(t), y_2(t) \cdots y_k(t)]
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

a_{ij} 为系数，可以是时间函数，也可以不是。

现在介绍一些术语：

系统的阶 是表征该系统所必须的导数的最高阶。

系统的等级 是表征该系统所必须的联立方程数。

线性和非线性系统

试讨论有 $y_1(t), y_2(t), \cdots y_k(t)$ 的 k 个输入和 $x_1(t), x_2(t), \cdots x_n(t)$ 的 n 个输出的系统。假定加上一组输入 $y_{1a}(t), y_{2a}(t), \cdots y_{ka}(t)$ ，对于它们的响应是 $x_{1a}(t), x_{2a}(t), \cdots x_{na}(t)$ 。如果又加上另一组输入 $y_{1b}(t), y_{2b}(t), \cdots y_{kb}(t)$ ，对它们的响应是 $x_{1b}(t), x_{2b}(t), \cdots x_{nb}(t)$ 。再假定输入信号为 $y_{1a}(t) + b y_{1b}(t)$ ，

$y_{2a}(t) + b y_{2b}(t), \dots, y_{ka}(t) + b y_{kb}(t)$, 其中 b 是一个任意常数; 亦即每个输入信号变为原来的输入与 b 乘第二个输入相加之和。此时如果对于所有的 y 和 b , 其输出是

[illegible]

则系统就是线性的。式 1-2 表明线性系统对于一组输入之和的输出，就是它对各个输入的输出之和。这样的系统满足**叠加原理**。例如，在线性电阻上，若加上 $v_1(t)$ 产生 $i_1(t)$ ，加上 $v_2(t)$ 产生 $i_2(t)$ ，于是加上 $v_1(t) + v_2(t)$ 就得到 $i_1(t) + i_2(t)$ 。

式 1-2 还表明如果所有的输入乘以一个常数, 则所有的输出也乘以相同的常数。这样的系统称为**均匀的**。在线性电阻的情况下, 如加上 $v_1(t)$ 产生 $i_1(t)$, 则加上 $5 v_1(t)$ 就产生 $5 i(t)$ 。如果系统是线性的, 可以用线性联立微分方程来表征。

如果系统不是线性的，就把它称为**非线性的**。一个非线性系统可以用一组非线性微分方程来表征，其中包含有变量的高次项。若一个器件上的电压是 $5i^3(t)$ ，则该器件就是非线性的，如晶体管就是这样的非线性器件。

时不变系统和时变系统

一个时不变系统，它的参数不随时间而改变。例如图 1-2。如果在任意时间内开关保持断开状态(或闭合状态)，则该网络是时不变的。但是如果开关在一段时间是断开的，另一段时间是闭合的（例如在 $0 \leq t \leq 1$ 时断开，在 $1 < t \leq 2$ 时闭合，在 $2 < t \leq 5$ 时断开，等等），则可以认为该网络是时变的。

注意在图中的情况下，即使开关保持一定状态，信号 $v_1(t)$