



普通高等教育规划教材

# 信号分析与处理

钱同惠 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



STM #0000h, McBSP1\_DXR1

普通高等教育规划教材

# 信号分析与处理

主编 钱同惠  
 副主编 陈爱萍 沈其聪  
 参编 任先平 周合俊 于军  
 主审 孔力

ISBN 978-7-111-30251-0  
 定价：28.00元

CALL IFT, RDY1  
 STM #0000h, McBSP1\_DXR1  
 RET

— READAD50;  
 STM 0x00FF, AR3  
 STM 0x1000, AR3  
 CALL  
 LDM McBSP1\_DXR1, B  
 STL B, \*AR2  
 BANA LOOP, \*AR3  
 RET

三、FIR 低通滤波器的实现  
 利用 MATLAB 设计一个 80 阶低通滤波器，其截止频率为 0.1 的信号频率。也就是 0.05 的采样频率。其系数放到 bb 缓冲区中，

table: ; 低通 0-0.05fm / fm  
 word 1-8, 10, 17, 24, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000



机械工业出版社



本书系统地介绍了信号分析与处理的基本理论、基本分析与处理方法和基本实现方法。全书共分九章，第一章综述了信号分析与处理学科概貌及其应用领域；第二、三章介绍了连续时间信号与系统在时域、频域及复频域内的分析方法和基本理论，给出了连续傅里叶变换、拉普拉斯变换的定义和性质；第四、五章叙述了离散时间信号与系统在时域、频域及复频域内的分析方法和基本理论，介绍了离散傅里叶变换及其快速算法、 $z$ 变换的定义与性质，同时给出了连续时间信号的采样定理；第六章研究了模拟与数字滤波器的设计原理、设计方法、结构特点及其实际应用，同时给出了各种滤波器之间频率转换方法；第七章讨论了随机信号的时域和频域分析与处理的基本方法，给出了描述随机信号的数字特征、相关函数和功率谱的定义与性质，叙述了随机信号通过线性系统的分析与设计方法；第八章给出了较为常用的现代信号分析与处理的基本方法；第九章介绍了数字信号处理器的结构特点、结合应用实例讨论了DSP系统的设计方法。

本书体系结构紧凑、叙述方法简明、应用实例丰富、习题安排多样，所配的MATLAB例题和习题均已调试通过，理论叙述上注重物理概念、数学概念和工程概念紧密结合，撰写方式注重图文并茂，体现了应用型人才培养特点的需要。

本书可作为高等院校自动化、测控技术与仪器、通信工程、电子信息工程等电气信息类专业的教材，也可作为从事信息学科中信号分析与处理相关工作的科技研究人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

信号分析与处理/钱同惠主编. —北京: 机械工业出版社, 2006. 12  
普通高等教育规划教材  
ISBN 978-7-111-20521-0

I. 信... II. 钱... III. ①信号分析—高等学校—教材②信号处理—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 150558 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 苏颖杰

责任编辑: 刘丽敏 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 姚毅 责任印制: 李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19 印张·470 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-20521-0

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 - 88379641 - 88379643

编辑热线电话: (010)88379726

封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育应用型人才培养规划教材 编 审 委 员 会

主 任：刘国荣

湖南工程学院

副主任：左健民

南京工程学院

陈力华

上海工程技术大学

鲍 泓

北京联合大学

王文斌

机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

刘向东

华北航天工业学院

任淑淳

上海应用技术学院

何一鸣

常州工学院

陈文哲

福建工程学院

陈 峻

扬州大学

苏 群

黑龙江工程学院

娄炳林

湖南工程学院

梁景凯

哈尔滨工业大学 (威海)

童幸生

江汉大学

# 自动化专业分委员会 会 员 委 审 会

- 主任：刘国荣 湖南工程学院  
副主任：汤天浩 上海海事大学  
梁景凯 哈尔滨工业大学（威海）
- 委员：（按姓氏笔画排序）
- |     |          |
|-----|----------|
| 刘启中 | 上海工程技术大学 |
| 刘国繁 | 湖南工程学院   |
| 陈虹  | 扬州大学     |
| 宋丽蓉 | 南京工程学院   |
| 钱同惠 | 江汉大学     |
| 黄家善 | 福建工程学院   |

用立分題，奇林出突。S

序

工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止，我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才，为经济的发展作出了巨大的贡献。但据 IMD1998 年的调查，我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第 36 位，与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下，国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校，并于 2001、2002 年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”，对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的，以适应经济、社会发展对工程教育的新要求，满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言：“科学家研究已有的世界，工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律，所以科学强调分析，强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学（包括自然科学、技术科学和社会科学）理论和技术手段去改造客观世界的实践活动，所以它强调综合，强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案，采用不同的培养模式，采用具有不同特点的教材。然而，我国目前的工程教育没有注意到这一点，而是：①过分侧重工程科学（分析）方面，轻视了工程实际训练方面，重理论，轻实践，没有足够的工程实践训练，工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象，导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一，课程结构不合理，知识面过窄，导致知识结构单一，所学知识中有一些内容已陈旧，交叉学科、信息学科的内容知之甚少，人文社会科学知识薄弱，学生创新能力不强。③教材单一，注重工程的科学分析，轻视工程实践能力的培养；注重理论知识的传授，轻视学生个性特别是创新精神的培养；注重教材的系统性和完整性，造成课程方面的相互重复、脱节等现象；缺乏工程应用背景，存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验，自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展，培养更多优秀的工程技术人员，我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材，目的在于改革传统的高等工程教育教材，建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材，满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是：

### 1. 保证基础，确保后劲

科技的发展，要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此，从内容安排上，保证学生有较厚实的基础，满足本科教学的基本要求，使学生日后具有较强的发展后劲。



## 2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标, 以工程应用为背景, 通过理论与工程实际相结合, 构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针: 知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为: “精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上, 挑选出最基本的内容、方法及典型应用; “新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容, 以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容, 并将这些按新的教学系统重新组织; “广”指在保持本学科基本体系下, 处理好与相邻以及交叉学科的关系; “用”指注重理论与实际融会贯通, 特别是注入工程意识, 包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

## 3. 抓住重点, 合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设, 并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设, 力争做好与之配套的电子教材的建设。

## 4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验, 又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务, 以确保教材质量。

我们相信, 本套系列教材的出版, 对我国工程应用型人才培养质量的提高, 必将产生积极作用, 会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光, 高瞻远瞩, 及时提出并组织编写这套系列教材, 他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作, 并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件, 在此深表衷心感谢!

编委会主任

湖南工程学院院长

刘国荣教授

## 前 言

今天人们正生活在分享着信息科学与技术日新月异发展带来的各种成果之中。信息科学与技术的研究对象是信息传输、处理和控制在信息科学和技术的基础是信号、系统和信号分析与处理的理论与方法。“信号分析与处理”这门课程正是近几年来,在适应信息学科迅速发展、相应基础理论教学要求不断更新的情况下,形成的一门新课程。它整合了“信号与系统分析”和“数字信号处理”两门课程体系彼此存在的内在联系,注重了与“自动控制理论”课程的分工,从电子信息学科教学的基本任务出发,以信号分析为基础,系统分析为桥梁,处理技术为手段,系统设计为目的,实现原理、方法和应用三结合,使系统分析与设计服从于信号交换与处理的需要,从根本上改变了传统的以系统分析为主、信号处理为辅的状况,加强了两门课程之间的联系。

随着信息技术的不断发展和信息技术应用领域的不断扩展,这门课程已经从电子信息工程类专业的专业基础课程扩展成电子信息、自动控制、电子技术、电气工程、计算机技术、生物医学工程等众多电类专业的专业基础课程,甚至在很多非电专业中也设置了这门课程。而其内容也从单一的电系统分析扩展到许多非电系统分析。虽然各个专业开设这门课程时的侧重点会有所不同,应用背景也有差异,但是,本课程所提炼的信号与系统的分析、处理的基本理论及基本方法是通用的。因此,本书按照普通高等教育应用型人才培规划教材编审委员会要求,由自动化专业委员会推荐编写与出版,可作为自动化专业、测控技术与仪器专业及电气信息类等其他专业的应用型本科学生学习信号分析与处理的理论、技术的教材。

“信号分析与处理”课程是自动化专业的一门主干课程,同时又是一门基础理论和实践性很强的课程。本书在编写中力求做四个“三结合”。课程体系上突出“信号、系统与处理”三结合;教材内容上突出“原理、方法与应用”三结合;教材讲述上突出“物理概念、数学概念和工程概念”并重的三结合;习题安排上突出“练、做与查”三结合的主动学习方法。全书在精讲理论的基础上,每一章均配有已调试通过的 MATLAB 程序,既给出了该理论的实现方法,又能直观地、形象地加深对概念的理解。每章的练习既有理论计算题和证明题,又有上机实验题,还有综合思考题,希望能启发学生的主动学习精神,使教材能充分体现应用型人才培养的特色(本教材中的教学课件、源程序和部分习题解答可联系:llm7785@sina.com)。

本教材共分九章,具体内容安排如下:

第一章为信号分析与处理概述。从信号、系统、分析与处理的基本概念与应用领域出发,简要介绍了学科的基本框架、研究任务和发展动态。

第二章为连续时间信号的分析,主要介绍了连续时间信号的特点与基本分析方法。内容包括连续信号的时域描述方法、信号的分解,连续时间周期信号和非周期信号在频域、复频域的分析,以及连续时间信号与频域和复频域的关系。

第三章为连续时间系统的分析,主要介绍了连续时间系统的特点与基本分析方法。内容包括连续时间系统在时域、频域和拉普拉斯复频域上分析。



第四章为离散时间信号与系统在时域和 $z$ 域分析,叙述了离散时间信号与系统的基础理论。内容包括离散时间信号的时域表示与运算,离散时间系统的定义、分类、描述与性质,连续时间信号的离散化,给出时域采样定理,以及离散时间信号与系统的 $z$ 域分析和离散时间信号的 $z$ 变换与连续信号的拉普拉斯变换、傅里叶变换之间的关系。

第五章为离散时间信号与系统的频域分析,主要介绍了离散傅里叶变换的基础理论。内容包括序列的傅里叶变换(DTFT)、离散周期信号的傅里叶变换(DFS)和有限长非周期信号的傅里叶变换(DFT)及其快速算法(FFT)的定义与性质,并举例说明了其应用。

第六章为滤波器设计与应用,介绍了确定性信号处理这一重要手段的基本理论与基本方法。内容概括滤波器的分类与技术指标、模拟滤波器的设计方法、数字滤波器中IIR滤波器与FIR滤波器两类不同的设计方法及其应用、数字滤波器的结构与软件实现方法。

第七章为随机信号分析与处理,介绍了随机性信号分析与处理的基本理论与基本方法。内容概括随机时间信号的描述与分类,重点分析平稳随机过程和各态历经随机过程的数字特征与性质,随机时间信号的频域分析方法——功率谱的定义与性质,随机信号通过线性系统的时域、频域分析方法以及设计与应用。

第八章为现代信号处理技术导论,简要说明了现代信号分析与处理中几种常用技术的基本原理与基本方法。内容包括随机信号的高阶统计分析和信号的时频分析方法,其中包括高阶累积量、高阶谱、短时傅里叶变换和小波变换法。

第九章为数字信号处理器。从数字信号处理器(简称DSP)与单片机的不同点出发,简要介绍了DSP芯片结构、指令特点、系统开发的基本原理,并结合应用实例来综合介绍DSP系统的设计。

本书由钱同惠任主编,第一、六、七章由钱同惠、沈其聪编写,第二、三章由任先平编写,第四、五章由陈爱萍编写,第八章由周俊编写,第九章由于军编写。全书由钱同惠、沈其聪统稿和整理。孔力教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵的修改意见。

在本书编写过程中,得到了普通高等教育应用型人才培规划教材编审委员会自动化专业分委员会的认真指导,得到了胡正修老师、陈娟同学的支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,不妥与错误之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编者 于青又  
2006年8月

本书由钱同惠任主编,第一、六、七章由钱同惠、沈其聪编写,第二、三章由任先平编写,第四、五章由陈爱萍编写,第八章由周俊编写,第九章由于军编写。全书由钱同惠、沈其聪统稿和整理。孔力教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵的修改意见。

在本书编写过程中,得到了普通高等教育应用型人才培规划教材编审委员会自动化专业分委员会的认真指导,得到了胡正修老师、陈娟同学的支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,不妥与错误之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编者 于青又  
2006年8月

# 目 录

序	
前言	
<b>第一章 信号分析与处理概述</b> .....	1
第一节 信号分析与处理的任务 .....	1
第二节 典型信号举例 .....	7
第三节 典型信号处理方法 .....	9
第四节 信号分析与处理学科概貌 .....	13
第五节 实践题 .....	15
<b>第二章 连续时间信号的分析</b> .....	18
第一节 连续时间信号的时域描述与分析 .....	18
第二节 连续时间信号的频域分析 .....	30
第三节 连续信号的复频域分析 .....	53
第四节 实践题 .....	69
<b>第三章 连续时间系统的分析</b> .....	73
第一节 系统的时域分析 .....	73
第二节 系统的频域分析 .....	75
第三节 系统的复频域分析 .....	84
第四节 实践题 .....	101
<b>第四章 离散信号与系统的时域和z域分析</b> .....	106
第一节 离散信号的时域分析 .....	106
第二节 线性移不变系统 .....	110
第三节 常系数线性差分方程 .....	116
第四节 连续信号的离散化与采样定理 .....	118
第五节 离散信号与系统的z域分析 .....	122
第六节 实践题 .....	135
<b>第五章 离散时间信号与系统的频域分析</b> .....	139
第一节 离散时间傅里叶变换 .....	139
第二节 离散周期信号的傅里叶分析 .....	142
第三节 有限长非周期序列的傅里叶变换 .....	144
第四节 有限长非周期序列的快速傅里叶变换 .....	152
第五节 实践题 .....	164
<b>第六章 滤波器设计与应用</b> .....	169
第一节 滤波器设计原则 .....	169
第二节 模拟滤波器设计 .....	173
第三节 IIR 数字滤波器设计 .....	187
第四节 滤波器的频率变换 .....	196
第五节 FIR 数字滤波器设计 .....	208
第六节 数字滤波器应用 .....	219
第七节 数字滤波器结构 .....	223
第八节 实践题 .....	227
<b>第七章 随机信号分析与处理</b> .....	232
第一节 随机信号描述 .....	232
第二节 平稳随机过程与各态历经随机过程 .....	239
第三节 功率谱 .....	244
第四节 随机信号通过线性系统的分析 .....	248
第五节 随机过程通过线性系统的设计与应用 .....	253
第六节 实践题 .....	257
<b>第八章 现代信号处理技术导论</b> .....	263
第一节 信号的高阶统计分析 .....	263
第二节 信号的时频分析 .....	268
第三节 现代信号处理的仿真实现 .....	275
第四节 实践题 .....	279
<b>第九章 数字信号处理器</b> .....	281
第一节 DSP 芯片的特点 .....	281
第二节 C54x DSP 的结构 .....	282
第三节 DSP 系统的开发 .....	285
第四节 DSP 系统实现的应用举例 .....	289
第五节 实践题 .....	293
<b>参考文献</b> .....	294

## 第一章 信号分析与处理概述

本章主要从信号分析与处理的研究对象、研究任务、应用领域和发展动态等方面简要地介绍信号分析与处理学科的概貌,以帮助读者构建学习和掌握“信号分析与处理”方法的基本框架和主线。

### 第一节 信号分析与处理的任务

在信息社会中,每天都可能打电话、看电视、上网等,处理着各种信息。现在,一提到“信息”就会联想到计算机和通信技术。其实,自人类产生到今天,人们改造社会、改造自然的一切活动中,彼此之间一直都在通过语言、图形、文字、数据、图像等来交换着各种信息。“信息”是对客观事物运动状态的描述,它既是抽象的,又可定量表示。寄载和传输信息的方式是多种多样的,如,道路交通控制和管理系统中,通过“红、绿、黄”三种颜色的交通灯传递着“绿灯行,红灯停”的信息,我们称之为信号灯而不是信息灯。因此,信号是信息的载体和具体表现形式,信息需寄载到传输媒质能够接收的信号中方能进行传输、处理和交换。广义地说,信号是随着时间变化的某种物理量。只有变化的量中,才可能含有信息。

信号种类繁多,如常遇到的语音信号、音乐、图像和视频信号等。信号是变量的函数,如时间变量、距离变量、温度和压力变量等。例如,语音和音乐信号就是空间上某点空气压力随时间变化的函数。一幅黑白图片代表了二维坐标的亮度函数。电视中的视频信号是由一组称为帧的图像序列所组成,是三个变量的函数,分别是二维空间坐标和时间。

信号携带着信息,信号处理目的是提取信号所携带的有用信息。提取信息的方法取决于信号的性质。只有对信号进行分析,充分了解信号特性,掌握它随时间或频率变化的规律,才能有效地对它进行处理和加工。

信息需要发布,信号需要传输、交换。现代的信息传输与交换主要依靠通信网络、计算机网络和控制网络,还有人工系统和自然系统等物理和非物理系统。“系统”是由若干相互作用和相互信赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。如脑、躯干、四肢、内脏等相互依赖、相互作用组成了人体系统。通信系统中的接收、传输、处理、交换、发送等相互联系的部分组成了具有特定功能的整体(若传输部分为无线,称为无线通信系统)。

信号处理可以理解为对信号进行某种加工或变换,其目的是:消除信号中冗余部分;滤除混杂的噪声和干扰;将信号变换成容易分析与识别的形式等。如航天飞船发回的照片可能淹没在噪声之中,可利用信号处理技术加以增强,在地球上获得清晰的图像。

信号分析与处理学科的主要任务是研究信号的种类、信号在不同域内的性质及其相互关系、信号通过系统的响应等内容,提出分析和处理信号的理论和方法。

#### 一、信号的定义与分类

信号分析与处理是信息学科的基础。信息科学是研究信息的性质、获取、传输、存储、



处理和控制的一门科学。信息是消息的表示形式，消息是信息的内容。信息只有通过一定形式的信号来表示，才能被传输、处理、存储、显示和利用。

信号传输系统和信号处理系统中的主体是信号。信号可表示为一个或多个变量的函数。一般情况下，信号表示为一个时间的函数。信号可按不同方式分类，通常的分类如下：

根据信号变量特性和取值不同，可将信号定义为不同的类型。例如，按独立变量是连续的还是离散的，可将信号分为连续或是离散的。另外，信号也可可是实函数或是复函数。

根据信号产生源不同，可将单个信号源产生的称为标量信号；由多个信号源产生的称为矢量信号或称为多通道信号。

根据信号变量多少，可分为一维信号即单变量函数、二维信号即两个变量的函数、多维(M-D)信号即多于一个变量的函数。语音信号是一维信号即时间为独立变量，用  $x(t)$  表示；黑白图像信号是二维信号，用  $f(x, y)$  表示其图像的亮度；活动的黑白电视图像是三维函数，像素点的亮度还随着时间变化，则用函数  $I(x, y, t)$  表示。本书主要以一维信号  $x(t)$  为研究对象。

根据信号所具有的时间函数特性，可以从不同的角度进行分类，将其分为确定性信号与随机性信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等，如图 1-1 所示。



图 1-1 信号的分类

### (一) 确定性信号与随机信号

将所有信息的集合称为“信息世界”。在信息世界中我们要处理一个个问题，而一个问题中所含的信息类型可能是如图 1-2 所示，其中，有确定性信息、不确定性信息、随机信息和模糊信息。

确定性信息大多都可用公式描述，按确定性规律变化的信号称为确定性信号。确定性信号可用数学解析式或确定性曲线准确地描述，在相同条件下能够重现，因此，只要掌握了变化规律，就能准确地预测它的未来。如正弦信号，它可用时间函数描述，对给定的任一时刻都对应有确定的函数值，包括未来时刻。

不确定性信息有多种不同形式。不确定性是因复杂性引起，会因无知、偶然、各式各样随机性、不精确、无法进行充分测量、缺乏知识或模糊不清而引

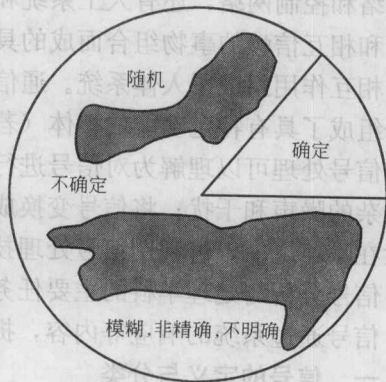


图 1-2 “信息世界”集合

起,就像自然语言中存在的模棱两可。如明天会下雨吗?张三是高个子吗?明确问题中不确定性的性质是选择解决问题方法的关键。

一种不确定性信息是可通过对其偶然发生的频度进行统计,并能找出其统计特性,这种随机变化的信号是时间、空间、或时间与空间两者的函数,每一次试验的结果被称为一个样本函数,所有可能样本函数的总集称为随机过程(随机信号)。随机信号的未来值不能用精确的时间函数描述,无法准确地预测,在相同条件下,它也不能准确地重现。如马路上噪声、收音机里出现的噪声干扰、电网电压的波动量、地震波等都是随机信号。同类问题在不同的时间、不同的空间上有许多性质。如,天气预报报告明天有60%的可能性会下雨,是不是意味着近100年中有60年的明天这一日子一直是雨天?是否意味着你的国家有60%的地区有雨?是否意味着这一天60%的时间有雨?人们根据对下雨概率的大概估计,就能对天气状况做出比较准确的判断。

另一种非随机的不确定性信息属含糊不清、模棱两可的信息,需取决于人的推理、感觉和决策,这种信息可用模糊集合与模糊逻辑来描述。

本书主要研究确定性信号和不确定性信号中的随机信号的基本性质。

## (二) 连续信号与离散信号

按照信号的时间函数变量的取值的连续性与离散性可将信号分为连续时间信号与离散时间信号。如果在所讨论的时间间隔内,除若干不连续点之外,对于任意时间值都可给出确定的函数值,此信号就称为连续信号。如正弦波、方波等,如图1-3所示。离散信号是在描述函数的定义域上的某些不连续的规定时刻有定义,其他时刻无定义的时间信号。如人口的出生率、连续信号经采样之后的信号,如图1-4所示。

应该指出,连续信号只强调时间坐标的连续,并不强调函数的幅值取值的连续,因此,一个时间坐标连续、幅度经过量化的信号仍然是连续信号,而那些时间和幅度均为连续取值的信号称为模拟信号(实际应用中,模拟信号与连续信号两词往往不予区分)。

如果离散时间信号的幅值是连续的,则又可取名为采样信号。另一种情况是离散时间信号的幅值被量化为离散值(如取值只能是“0”或“1”),也即时间与幅度都具有离散性,这种信号又称为数字信号。

## (三) 周期信号与非周期信号

周期信号是依一定时间间隔周而复始,而且是无始无终的信号。

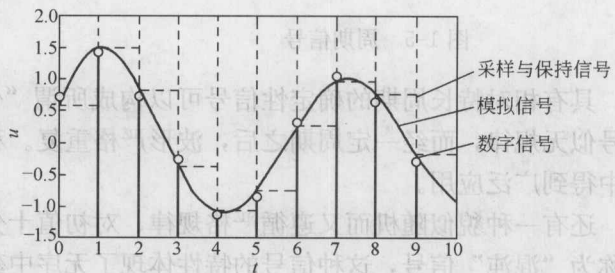


图 1-3 连续时间信号

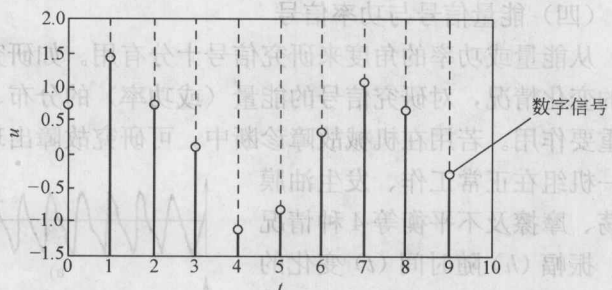


图 1-4 离散时间信号

对于连续信号,若存在  $T > 0$ , 使

$$x(t) = x(t + nT) \quad n \text{ 为整数} \quad (1-1)$$

对于离散信号,若存在大于零的整数  $N$ , 使

$$x(n) = x(n + kN), \quad k \text{ 为整数} \quad (1-2)$$

则称  $x(t)$ 、 $x(n)$  为周期信号,  $T$  和  $N$  分别为  $x(t)$  和  $x(n)$  的周期。显然,只要给出此信号在任一周期内的变化过程,便可确知它在任一时刻的数值,如图 1-5 所示。

不具有周而复始特性的信号称为非周期信号。若令周期信号的周期  $T$  趋于无限大,则成为非周期信号,如图 1-6 所示。

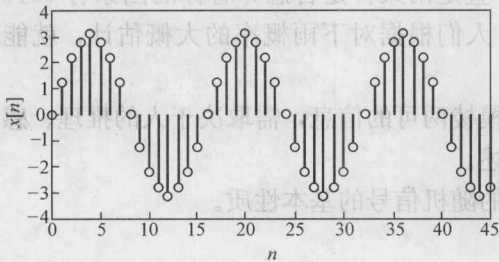


图 1-5 周期信号

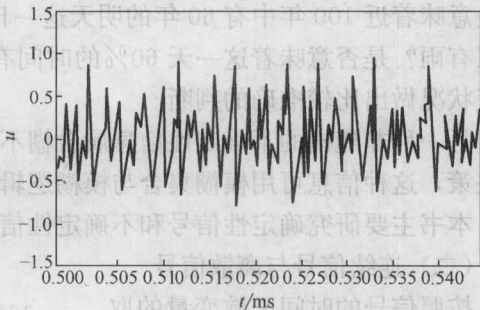


图 1-6 非周期信号

具有相对特长周期的确定性信号可以构成所谓“伪随机信号”,从某一时段来看,这种信号似无规律,而经一定周期之后,波形严格重复。利用这一特点产生的伪随机码在通信系统中得到广泛应用。

还有一种貌似随机而又遵循严格规律、对初值十分敏感、描述方法比较复杂的信号,人们称为“混沌”信号,这种信号的特性体现了无序中蕴含着有序的哲学思想。近年来,混沌理论的研究十分引人注目,这里不容易对混沌信号给出确切的定义。

本书主要讨论确定性信号中的周期性和非周期性的分析、随机性信号分析的初步知识。

#### (四) 能量信号与功率信号

从能量或功率的角度来研究信号十分有用。如研究信号的能量(或功率)在频域中随频率的变化情况,对研究信号的能量(或功率)的分布、决定信号所占有频带的变化情况等有着重要作用。若用在机械故障诊断中,可研究故障出现的原因。图 1-7 和图 1-8 分别给出了某一机组在正常工作、发生油膜振荡、摩擦及不平衡等 4 种情况下,振幅( $h$ )随时间( $t$ )变化的波形(如图 1-7a~d 所示)和随频率( $f$ )变化的频谱图(如图 1-8a~d 所示)。振动是一种周期性运动,它的两个基本特征是振幅和频率。振幅反映机组振动强度,但从图中可看到,仅监视时域内的振动峰-峰值,其判断是否发生故障的漏检可能性很大。因为早期故障对整个振动的峰-峰值影响不大,却使各个频率上能量的分布发生变化。从谱图上看,表现为某些频率上谱值增大明显。谱图的形状能反映故障类型。如果将机

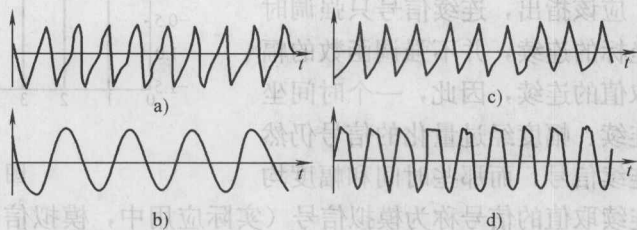


图 1-7 能量信号图

从图中可看到,仅监视时域内的振动峰-峰值,其判断是否发生故障的漏检可能性很大。因为早期故障对整个振动的峰-峰值影响不大,却使各个频率上能量的分布发生变化。从谱图上看,表现为某些频率上谱值增大明显。谱图的形状能反映故障类型。如果将机



组转动频率（即转速）称为  $1X$ ，发生故障时谱值会增大的频率称为特征频率，则观察图 1-8b 可见，发生油膜振荡的特征频率为  $1/2X$ ，摩擦的特征频率为  $1X$  及其各次谐波频率，不平衡的特征频率为  $1X$ 。显然，各特征频率上的能量谱值的大小及变化情况反映了旋转机械的运行状况，指明了早期故障隐患和所处部位，以及发展趋势。

所谓能量信号，可把信号  $x(t)$  看作加在  $1\Omega$  的电阻上的电流，则在时间间隔  $-T \leq t \leq T$  内所消耗的能量为

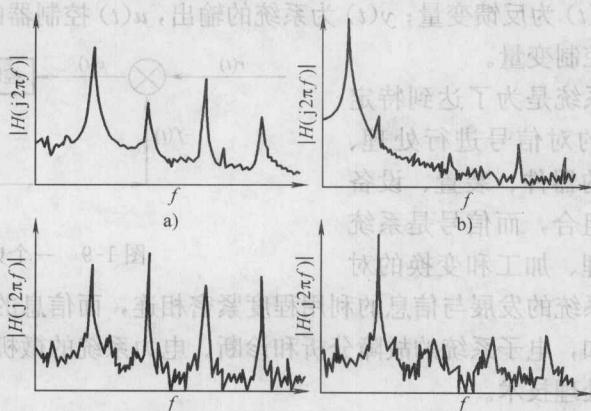


图 1-8 功率谱信号图

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt \quad (1-3)$$

其平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt \quad (1-4)$$

同样，对离散信号  $x(n)$ ，能量为

$$W = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (1-5)$$

其平均功率为

$$P = \lim_{m \rightarrow 0} R_x(m) = \lim_{m \rightarrow \infty} E\{x(n)x(n+m)\} \quad (1-6)$$

式中， $R_x(m)$  为  $x(n)$  的自相关函数； $m$  为时间间隔。

若信号能量函数平方可积，则  $W$  为有限值，称为能量有限信号，简称为能量信号。能量信号的平均功率为零。客观存在的信号大多是持续时间有限的能量信号。

另一种情况，信号  $x(t)$  的  $W$  趋于无穷大，而  $P$  为不等于零的有限值，则称为功率信号。如一个幅度有限的正弦信号，能量无限而功率有限。一个无限能量信号的平均功率是有限的，可以从功率角度来对信号进行考查，并视为功率信号。例如，正弦信号表示为

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta), \quad -\infty < t < \infty \quad (1-7)$$

其能量

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T A^2 \cos^2(\omega_0 t + \theta) dt = \infty \quad (1-8)$$

其功率

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{2T} \int_{-T}^T \cos^2(\omega_0 t + \theta) dt = \frac{A^2}{2} \quad (1-9)$$

所以，该信号为功率信号。

## 二、系统的定义与分类

在工程和科学技术发展过程中，自动控制系统担负着重要角色。系统是一些部件的组合，这些部件组合在一起，完成一定的任务。系统不限于物理系统。系统的概念可以应用于抽象的动态现象，如在经济学中遇到的一些现象。因此，“系统”这个词，应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等方面的系统。图 1-9 为一个典型的自动控制系统框图。其中

$r(t)$  为系统的输入变量;  $e(t)$  为控制器的输入, 也是输入变量与反馈变量之差, 称为偏差变量;  $f(t)$  为反馈变量;  $y(t)$  为系统的输出,  $u(t)$  控制器的输出, 即控制对象上所施加的控制, 称为控制变量。

系统是为了达到特定的目的对信号进行处理、变换的器件、装置、设备及其组合, 而信号是系统要处理、加工和变换的对象。

系统的发展与信息的利用程度紧密相连, 而信息的利用程度则有赖于信号分析、处理技术。如, 电子系统的故障分析和诊断、电力系统的微机保护、谐波抑制等都需要进行信号分析与处理技术。

系统是相互依赖、相互作用的若干事物组成的具有特定功能的整体。它广泛存在于自然界、人类社会和工程技术等各个领域, 如脑、躯干、四肢、内脏等相互依赖、相互作用组成了人体系统。通信系统中的发送、传输、交换、处理、接收等相互联系的部分组成了具有特定功能的整体 (若传输信道为无线, 称为无线通信系统), 如图 1-10 所示。

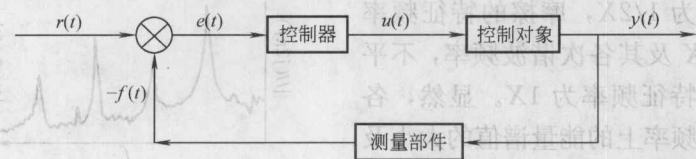


图 1-9 一个典型的自动控制系统框图

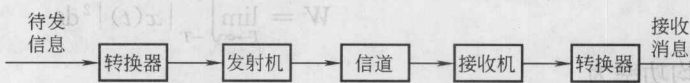


图 1-10 通信系统的组成

系统可根据其不同类型的性质分为以下几种类型:

#### (一) 线性系统与非线性系统

一般说, 线性系统是同时具有齐次性和叠加性的系统。齐次性是指当输入激励  $e(t)$  改变为原来的  $k$  倍, 输出响应  $y(t)$  也相应地改变为原来的  $k$  倍, 这里  $k$  为任意常数。符号表示为

$$\text{若 } e(t) \rightarrow y(t), \text{ 则 } ke(t) \rightarrow ky(t) \quad (1-10)$$

叠加性是指当有几个激励 ( $e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)$ ) 同时作用于系统上时, 系统的总响应  $y(t)$  等于各个激励分别作用于系统所产生的分量响应之和。符号表示为

$$\text{若 } e_1(t) \rightarrow y_1(t), e_2(t) \rightarrow y_2(t), \text{ 则 } e_1(t) + e_2(t) \rightarrow y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (1-11)$$

线性系统应当同时具备式 (1-10) 和式 (1-11) 性质, 所满足线性系统的条件是

$$\text{若 } e_1(t) \rightarrow y_1(t), e_2(t) \rightarrow y_2(t), \text{ 则 } ke_1(t) + ke_2(t) \rightarrow y(t) = ky_1(t) + ky_2(t) \quad (1-12)$$

非线性系统不具备式 (1-12) 的条件。

对于初始状态不为零的系统, 如将初始状态视为独立的信号源产生的响应的因素, 则运用叠加性, 系统的全响应  $y(t)$  可以看成是零输入响应  $y_{zi}(t)$  与零状态响应  $y_{zs}(t)$  之和, 即

$$y(t) = y_{zi}(t) + y_{zs}(t) \quad (1-13)$$

式 (1-13) 有时被称为可分解性。如果系统的  $y_{zi}(t)$  与  $y_{zs}(t)$  俱满足式 (1-12) 的线性要求, 即系统具有可分解性且同时具有零输入线性与零状态线性, 则该系统仍视为线性系统。

#### (二) 时不变系统与时变系统

时不变系统的性质不随时间变化, 或者说, 它具有响应的形状不随激励施加的时间不同而改变的特性。时变系统的参数与性质随时间而变化。设时不变系统对于激励  $e(t)$  的响应

是  $y(t)$ ，则当激励延迟一时间而成为  $e(t-t_0)$  时，其响应也延迟一相同时间而形状不变。符号表示为

$$\text{若 } e(t) \rightarrow y(t), \text{ 则 } e(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0) \quad (1-14)$$

时变系统不具备式 (1-14) 条件。线性系统可以是时不变的，也可以是时变的。若是线性时不变系统，则应同时满足式 (1-12) 和式 (1-14)，得

$$\text{若 } e_1(t) \rightarrow y_1(t), e_2(t) \rightarrow y_2(t) \\ \text{则 } k_1 e_1(t-t_0) + k_2 e_2(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0) = k_1 y_1(t-t_0) + k_2 y_2(t-t_0) \quad (1-15)$$

### (三) 因果和非因果系统

人们的生活活动、事物发展都遵循着因果规律。一切物理现象，都要满足先有原因然后产生结果，结果不能早于原因而出现这样的因果关系。对于一个系统，激励是原因，响应是结果，响应不可能出现于施加激励之前的系统为因果系统，否则，则是非因果系统。响应先于激励的系统是不可实现系统。

### (四) 稳定和不稳定系统

稳定系统是指有界的输入产生有界的输出的系统。反之，则称为不稳定系统。我们设计的系统大多都是稳定的系统。

### (五) 递归和非递归系统

递归系统是指输出对输入有反馈，即系统的输出不仅取决于系统的输入，还与输出值有关。图 1-9 所示的控制系统是递归系统。非递归系统是指输出对输入无反馈，即系统的输出仅取决于输入的系统。图 1-10 所示的通信系统就是非递归系统。

### (六) 连续时间与离散时间系统

连续与离散时间系统是根据它们所传输与处理的信号的性质而定的。连续时间系统的激励和响应在连续时间的一切值上都有确定的意义；而离散时间系统的激励和响应信号则是不连续的离散序列。

本书主要研究线性时不变的稳定因果的递归和非递归型的连续时间系统和离散时间系统。

## 三、线性时不变系统的分析

当信号通过线性时不变系统后产生的响应的性质，是大家关心的问题。系统的响应既取决于输入信号的性质，又取决于系统本身的性质。研究系统的性质，需要建立系统的数学模型。求解该数学模型的方法有时域法、频域法和复频域法。若是连续时间系统，常用常系数线性微分方程或卷积法、傅里叶变换定理、拉普拉斯变换法来描述系统模型。若是离散时间系统，常用差分方程或离散卷积法、离散傅里叶变换法和  $z$  变换法来描述。

本书将着重研究线性时不变系统连续与离散时间系统的时域与变换域的解法。

## 第二节 典型信号举例

为了更好地了解信号处理任务的广度，先来观察一些典型应用中的典型信号及其应用。

### 一、心电信号

心电图用 ECG 信号表示，典型的 ECG 信号轨迹，如图 1-11a 所示。ECG 轨迹基本是一个周期波形，它的一个周期表示血液从心脏到动脉的一个传输循环过程，如图 1-11b 所示。