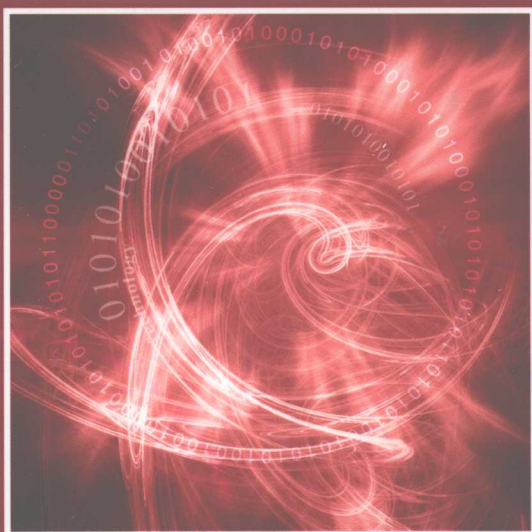




普通高等教育“十一五”规划教材

# 信号与系统

● 王玲花 主编



免费  
电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”规划教材

# 信号与系统

主 编 王玲花  
副主编 孙美凤  
参 编 王继东 徐俊红 蒋 礼 姚淑霞 徐 燕  
主 审 张瑞金



机械工业出版社

本书系统讲述了信号与系统的基本概念与理论及其分析方法。全书共分8章,重点讲述了线性时不变系统,主要内容包括连续信号与系统的基本概念及其时域分析法、傅里叶级数分解与傅里叶变换及频域分析法、拉普拉斯变换及复频域分析法、离散信号与系统的基本概念及其时域与频域分析方法,还介绍了信号与系统理论在信号处理和通信方面的基本应用,最后介绍了连续系统与离散系统的状态变量描述方法。每章都配有小结和丰富精炼的例题与习题,并给出典型的 MATLAB 仿真例题,书后附有部分习题参考答案。

本书可作为电子工程、通信、自动化、电气工程及其自动化、计算机类、机电类等相关专业“信号与系统”的本科生教材,也可供从事信息获取、转换、传输和处理、系统设计等领域的研究生、教师和广大科技工作者自学与参考,并可作为相关理工科专业“信号与系统”课程的研究生入学考试参考书。

为方便教师教学,本书配有免费教学课件,欢迎选用本书作为教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 或发邮件索取,索取邮箱: [llm7785@sina.com](mailto:llm7785@sina.com)。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统/王玲花主编. —北京:机械工业出版社,2008.10  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-111-25355-6

I. 信… II. 王… 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 (2008) 第 160419 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:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏

责任校对:申春香 封面设计:张静 责任印制:洪汉军

中国农业出版社印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22.5 印张 · 555 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25355-6

定价:40.00 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

# 前 言

随着科学技术的日新月异,信息技术在当今社会中的重要性日渐体现,应用领域迅速拓展。“信号与系统”课程已从电子信息工程类专业的专业基础课扩展成电子信息、电子技术、自动化、电气工程、计算机技术、光电科学、通信工程等众多电类专业的专业基础课,甚至在很多非电专业领域如:信息与计算科学、地球物理学、生物医学工程、动力机械等专业领域内也涉及到这门课。“信号与系统”现已成为众多学科研究生入学考试的一门重要课程,其授课内容也从单一的电系统分析扩展到许多非电系统分析;其应用背景也从单一的通信系统扩展到其他信息处理系统;其后续课程涉及多个领域,如数字信号处理、通信原理、通信电路、图像处理、微波技术、时频分析等。虽然各专业开设这门课的侧重点有所不同,应用背景也有差异,但本课程依然保留了两种系统(连续和离散时间系统)、两类方法(时域和频域分析法)、三大变换(傅里叶变换、拉普拉斯变换和 $Z$ 变换)的教学体系。

本书是由从事“信号与系统”课程教学多年的教师针对学生认知的特点,结合教学实践编撰而成的。本书系统论述了信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法,重点讲述信号与系统分析、处理的基本原理与方法。全书共分8章,第1章介绍信号和系统的基本知识;第2章讲述连续时间系统的时域分析;第3章讲述傅里叶变换分析;第4章讲述拉普拉斯变换分析;第5章讲述离散时间系统的时域分析;第6章讲述离散信号与系统的 $Z$ 变换域分析;第7章讲述信号与系统理论的应用;第8章讲述线性系统的状态空间分析法。

本书内容精炼,深入浅出,适当弱化电路分析方面的内容,侧重对信号与系统的分析,便于学生掌握本课程的核心内容。采用理论分析与实际应用相结合的方法,将信号分析与系统分析有机地融为一体。既给出了基本原理的数学推导过程,又通过大量的实例使学生对信号与系统分析的一般方法有一个直观的认识,能够将数学的推导过程与实际的信号、系统处理方法相结合,从而在提高读者应用技能的同时,为后续相关课程的学习打下坚实的基础。本书总体结构上采用先连续后离散的顺序,通过对比两者的异同,加深读者对“连续”与“离散”概念及其特性的正确理解。针对本课程理论性强的特点,为解决“解题难”问题,本书给出了大量的例题分析方法和解题技巧,用以开拓思路,进一步加深对基本概念和基本理论的理解。在各章之后还给出小结,并附有类型各异、不同深度的典型习题,供读者练习。针对本课程应用性较强的特点,为培养学生的实践能力,在介绍重要原理与分析方法之后给出了一定的MATLAB仿真程序,并对重点语句的功能与作用给出了注释,使学生不用专门学习MATLAB,就可很快编程上机练习,具有较强的实用性。

“信号与系统”是一门开放性的基础课,该课程涉及到一些数学和电类课程,如高等数学、线性代数等,读者宜先期学习上述知识。本书每一部分内容都可根据专业需要深化和扩展,如频谱分析可扩展到通信理论的内容;傅里叶变换可扩展到时频分析的内容;离散信号的 $Z$ 变换域分析可扩展到数字信号处理的内容;复频域分析可扩展到网络综合的内容;状态空间分析可扩展到状态控制的内容等。为了适合不同学科的教学,全书难度选取适中,内容覆盖面较广,既有利于授课教师灵活选材,也为读者自学提供了较好的条件,任课教师可

根据自己专业特点和学时灵活授课。这里推荐两套方案：讲述第1~4、7章（适合48学时）；讲述所有章节（适合64学时以上）。

本书由华北水利水电学院王玲花任主编，孙美凤任副主编。第1章、第8章8.1、8.2节由王玲花执笔，第2章、第5章由孙美凤执笔，第6章、第3章3.9节、第8章8.5~8.7节由王继东执笔，第4章及附录与习题答案由徐俊红执笔，第3章3.1~3.8节由蒋礼执笔，第3章3.10和3.11节、第7章由姚淑霞执笔，第8章8.3、8.4节由徐燕执笔。郑州大学张瑞金教授对全书内容进行了认真的审核，在此表示衷心的感谢。此外，本书还参阅了国内外大量著作与文献资料，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不当之处，欢迎使用本书的广大师生及其他读者给予指正。

编者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 信号与系统的基本知识</b> .....	1
1.1 信号与系统的定义 .....	1
1.2 信号的分类与基本特性 .....	4
1.3 典型信号 .....	9
1.4 信号的基本运算 .....	18
1.5 信号的分解 .....	23
1.6 系统的描述及其分类 .....	31
1.7 线性系统的基本特性及其模拟框图 .....	35
1.8 信号与系统的分析方法 .....	38
1.9 MATLAB 的有关知识 .....	39
本章小结 .....	42
习题 .....	43
<b>第 2 章 连续时间系统的时域分析</b> .....	47
2.1 微分方程的建立与求解 .....	47
2.2 零输入响应和零状态响应 .....	56
2.3 冲激响应和阶跃响应 .....	59
2.4 卷积及其性质 .....	62
2.5 卷积积分的图解法 .....	67
2.6 LTI 系统的算子符号表示与传输算子 .....	69
2.7 利用 MATLAB 进行系统的时域分析 .....	76
本章小结 .....	78
习题 .....	78
<b>第 3 章 傅里叶变换分析</b> .....	86
3.1 傅里叶变换的产生 .....	86
3.2 周期信号的傅里叶分析 .....	86
3.3 周期信号的对称性 .....	95
3.4 常见周期信号的频谱 .....	97
3.5 非周期性信号的频谱 .....	109
3.6 傅里叶变换的性质 .....	121
3.7 周期信号的傅里叶变换 .....	133
3.8 抽样定理 .....	137
3.9 功率频谱与能量频谱 .....	147
3.10 系统的频域分析法 .....	152
3.11 希尔伯特变换 .....	162
本章小结 .....	165

习题 .....	166
<b>第 4 章 拉普拉斯变换分析</b> .....	173
4.1 拉普拉斯变换 .....	173
4.2 常见信号的拉普拉斯变换 .....	176
4.3 拉普拉斯变换的性质 .....	177
4.4 拉普拉斯逆变换 .....	183
4.5 拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系 .....	189
4.6 系统函数与频率响应特性 .....	190
4.7 系统的模拟 .....	198
本章小结 .....	204
习题 .....	204
<b>第 5 章 离散时间系统的时域分析</b> .....	210
5.1 离散时间信号 .....	210
5.2 离散系统的数学模型 .....	214
5.3 线性时不变系统的解法 .....	217
5.4 离散时间系统的单位冲激响应 .....	222
5.5 离散卷积和 .....	225
本章小结 .....	227
习题 .....	227
<b>第 6 章 离散信号与系统的 Z 变换域分析</b> .....	231
6.1 Z 变换 .....	231
6.2 Z 反变换 .....	235
6.3 Z 变换的性质 .....	236
6.4 Z 变换与拉氏变换的关系 .....	238
6.5 用 Z 变换求解差分方程 .....	240
6.6 离散系统函数与系统特性 .....	243
6.7 离散信号与系统的频域分析 .....	249
6.8 离散系统的模拟与信号流程图 .....	254
本章小结 .....	261
习题 .....	261
<b>第 7 章 信号与系统理论的应用</b> .....	264
7.1 无失真传输概念 .....	264
7.2 理想滤波器 .....	265
7.3 模拟滤波器 .....	268
7.4 数字滤波器 .....	279
7.5 调制与解调 .....	283



7.6 频分复用和时分复用 ..... 287

本章小结 ..... 290

习题 ..... 290

**第8章 线性系统的状态空间分析法** ... 292

8.1 状态空间的基本概念 ..... 292

8.2 建立状态空间表达式的方法 ..... 295

8.3 状态空间表达式的解 ..... 304

8.4 状态的能控性和能观性 ..... 313

8.5 离散系统状态方程的建立 ..... 320

8.6 线性定常离散系统的可控性和  
可观测性 ..... 326

8.7 采样周期对离散化系统可控性和  
可观测性的影响 ..... 330

本章小结 ..... 332

习题 ..... 332

**附录** ..... 335

附录 A 矢量与函数的运算与分解比较 ..... 335

附录 B 卷积表 ..... 335

附录 C 常见信号的傅里叶变换 ..... 336

附录 D 傅里叶变换的性质 ..... 337

附录 E 常见信号的单边拉普拉斯变换 ..... 338

附录 F 单边拉普拉斯变换的性质 ..... 338

附录 G 常见信号的双边拉普拉斯变换 ..... 339

附录 H 常用函数的 Z 变换 ..... 339

**部分习题答案** ..... 341

**参考文献** ..... 352

303 ..... 303

304 ..... 304

310 ..... 310

311 ..... 311

312 ..... 312

313 ..... 313

314 ..... 314

315 ..... 315

316 ..... 316

317 ..... 317

318 ..... 318

319 ..... 319

320 ..... 320

321 ..... 321

322 ..... 322

323 ..... 323

324 ..... 324

325 ..... 325

326 ..... 326

327 ..... 327

328 ..... 328

329 ..... 329

330 ..... 330

331 ..... 331

332 ..... 332

333 ..... 333

334 ..... 334

335 ..... 335

336 ..... 336

337 ..... 337

338 ..... 338

339 ..... 339

340 ..... 340

341 ..... 341

342 ..... 342

343 ..... 343

344 ..... 344

345 ..... 345

346 ..... 346

347 ..... 347

348 ..... 348

349 ..... 349

350 ..... 350

351 ..... 351

352 ..... 352

353 ..... 353

354 ..... 354

355 ..... 355

356 ..... 356

357 ..... 357

358 ..... 358

359 ..... 359

360 ..... 360

361 ..... 361

362 ..... 362

363 ..... 363

364 ..... 364

365 ..... 365

366 ..... 366

367 ..... 367

368 ..... 368

369 ..... 369

370 ..... 370

371 ..... 371

372 ..... 372

373 ..... 373

374 ..... 374

375 ..... 375

376 ..... 376

377 ..... 377

378 ..... 378

379 ..... 379

380 ..... 380

381 ..... 381

382 ..... 382

383 ..... 383

384 ..... 384

385 ..... 385

386 ..... 386

387 ..... 387

388 ..... 388

389 ..... 389

390 ..... 390

391 ..... 391

392 ..... 392

393 ..... 393

394 ..... 394

395 ..... 395

396 ..... 396

397 ..... 397

398 ..... 398

399 ..... 399

400 ..... 400

401 ..... 401

402 ..... 402

403 ..... 403

404 ..... 404

405 ..... 405

406 ..... 406

407 ..... 407

408 ..... 408

409 ..... 409

410 ..... 410

411 ..... 411

412 ..... 412

413 ..... 413

414 ..... 414

415 ..... 415

416 ..... 416

417 ..... 417

418 ..... 418

419 ..... 419

420 ..... 420

421 ..... 421

422 ..... 422

423 ..... 423

424 ..... 424

425 ..... 425

426 ..... 426

427 ..... 427

428 ..... 428

429 ..... 429

430 ..... 430

431 ..... 431

432 ..... 432

433 ..... 433

434 ..... 434

435 ..... 435

436 ..... 436

437 ..... 437

438 ..... 438

439 ..... 439

440 ..... 440

441 ..... 441

442 ..... 442

443 ..... 443

444 ..... 444

445 ..... 445

446 ..... 446

447 ..... 447

448 ..... 448

449 ..... 449

450 ..... 450

451 ..... 451

452 ..... 452

453 ..... 453

454 ..... 454

455 ..... 455

456 ..... 456

457 ..... 457

458 ..... 458

459 ..... 459

460 ..... 460

461 ..... 461

462 ..... 462

463 ..... 463

464 ..... 464

465 ..... 465

466 ..... 466

467 ..... 467

468 ..... 468

469 ..... 469

470 ..... 470

471 ..... 471

472 ..... 472

473 ..... 473

474 ..... 474

475 ..... 475

476 ..... 476

477 ..... 477

478 ..... 478

479 ..... 479

480 ..... 480

481 ..... 481

482 ..... 482

483 ..... 483

484 ..... 484

485 ..... 485

486 ..... 486

487 ..... 487

488 ..... 488

489 ..... 489

490 ..... 490

491 ..... 491

492 ..... 492

493 ..... 493

494 ..... 494

495 ..... 495

496 ..... 496

497 ..... 497

498 ..... 498

499 ..... 499

500 ..... 500

35 ..... 35

36 ..... 36

37 ..... 37

38 ..... 38

39 ..... 39

40 ..... 40

41 ..... 41

42 ..... 42

43 ..... 43

44 ..... 44

45 ..... 45

46 ..... 46

47 ..... 47

48 ..... 48

49 ..... 49

50 ..... 50

51 ..... 51

52 ..... 52

53 ..... 53

54 ..... 54

55 ..... 55

56 ..... 56

57 ..... 57

58 ..... 58

59 ..... 59

60 ..... 60

61 ..... 61

62 ..... 62

63 ..... 63

64 ..... 64

65 ..... 65

66 ..... 66

67 ..... 67

68 ..... 68

69 ..... 69

70 ..... 70

71 ..... 71

72 ..... 72

73 ..... 73

74 ..... 74

75 ..... 75

76 ..... 76

77 ..... 77

78 ..... 78

79 ..... 79

80 ..... 80

81 ..... 81

82 ..... 82

83 ..... 83

84 ..... 84

85 ..... 85

86 ..... 86

87 ..... 87

88 ..... 88

89 ..... 89

90 ..... 90

91 ..... 91

92 ..... 92

93 ..... 93

94 ..... 94

95 ..... 95

96 ..... 96

97 ..... 97

98 ..... 98

99 ..... 99

100 ..... 100

101 ..... 101

102 ..... 102

103 ..... 103

104 ..... 104

105 ..... 105

106 ..... 106

107 ..... 107

108 ..... 108

109 ..... 109

110 ..... 110

111 ..... 111

112 ..... 112

113 ..... 113

114 ..... 114

115 ..... 115

116 ..... 116

117 ..... 117

118 ..... 118

119 ..... 119

120 ..... 120

121 ..... 121

122 ..... 122

123 ..... 123

124 ..... 124

125 ..... 125

126 ..... 126

127 ..... 127

128 ..... 128

129 ..... 129

130 ..... 130

131 ..... 131

132 ..... 132

133 ..... 133

134 ..... 134

135 ..... 135

136 ..... 136

137 ..... 137

138 ..... 138

139 ..... 139

140 ..... 140

141 ..... 141

142 ..... 142

143 ..... 143

144 ..... 144

145 ..... 145

146 ..... 146

147 ..... 147

148 ..... 148

149 ..... 149

150 ..... 150

151 ..... 151

152 ..... 152

153 ..... 153

154 ..... 154

155 ..... 155

156 ..... 156

157 ..... 157

158 ..... 158

159 ..... 159

160 ..... 160

161 ..... 161

162 ..... 162

163 ..... 163

164 ..... 164

165 ..... 165

166 ..... 166

167 ..... 167

168 ..... 168

169 ..... 169

170 ..... 170

171 ..... 171

172 ..... 172

173 ..... 173

174 ..... 174

175 ..... 175

176 ..... 176

177 ..... 177

178 ..... 178

179 ..... 179

180 ..... 180

181 ..... 181

182 ..... 182

183 ..... 183

184 ..... 184

185 ..... 185

186 ..... 186

187 ..... 187

188 ..... 188

189 ..... 189

190 ..... 190

191 ..... 191

192 ..... 192

193 ..... 193

194 ..... 194

195 ..... 195

196 ..... 196

197 ..... 197

198 ..... 198

199 ..... 199

200 ..... 200

# 第1章 信号与系统的基本知识

## 1.1 信号与系统的定义

### 1.1.1 信号的有关概念

大自然中的鸟语花香，玉米的拔节声，雨打树叶的沙沙声，歌声，一封家书，电视广播新闻，医疗与经济信息等等，人类为表达这些感受，以及人们之间的情感交流与生活、工作需求等，所使用的语言、文字、图像、电磁波与数据等，被称为媒体（Media），也称为媒介，即人与人之间实现信息交流的中介，简单地说，就是信息的载体。而通过各种媒体表达的感觉、想法、意见与建议等被称为消息（Message），在消息中包含有一定数量的信息（Information）。

所谓信息，是指存在于客观世界中的一种事物现象，特指消息中有意义的内容。信息和消息密切相关。作为现代科学技术中普遍使用的一个概念，目前尚无统一的定义；作为日常用语，指音信、消息。客观世界中充满各种各样的信息，如上下班的铃声，电信局拍发和接收的电报，书报杂志上刊登的文章，乐曲、五颜六色的图画，色香味俱全的食品等等，一般事物都会发出信息，由此显示出事物之间的不同，从这一角度看，信息是表现事物特征的一种普遍形式。

人类生活在信息的海洋中，并通过信息来认识事物和改造世界。在人类的社会活动过程中，人们为了有效地传播和利用信息，经常需要将信息转换为便于传输、记忆和处理的信号。所谓信号（Signal），是“用来传递消息或命令的光、电波、声音、动作等”。也就是说，信号是运载、传递信息的载体与工具，如我国古代用烽火与狼烟报警，婴儿用啼哭表达饥饿或对冷热的感觉，飞机飞过空中时会在雷达荧光屏上出现一个运动着的光点等，这些都是信号的例子。信号一般表现为随时间变化的某种物理量。如飞机的飞行航向、速度、高度等随时间都在变化。根据信号所表示物理量的不同特性，可对信号进行具体的分类。如汽车的喇叭声，船舶与火车的汽笛声等，是声信号；火把、交通红绿灯、信号弹的亮光，光纤通信中的激光等，是光信号；广播、电视及移动电话从空中收到的电磁波，地震波，心电图与脑电图等，是电信号。此外，还有书本上的文字信号，照片上的图像信号，计算机显示器上的图像与文字信号，交通警察的手势信号，军舰使用的旗语信号，室内的湿度信号，水轮发电机组与汽轮发电机组的转动与振动信号，水库的水位与流量信号，锅炉的温度信号等。上述这些信号，虽然它们的物理意义与表现形式不同，但都是表示变化着的物理量，都包含有一定的意义。总之，信号就是载有一定信息的一种变化着的物理量。信号是信息的表现形式，信息则是信号的具体内容。

从早期的狼烟报警、击鼓鸣金报送时刻或传达命令，到后来的信鸽、驿站和旗语等，这些传递信息的方法，无论在距离、速度还是有效性与可靠性方面，都没有得到明显的改善。



目前, 传送电信号的通信方式得到了迅速发展, 无线广播、超短波通信、广播电视、雷达、无线电导航等的相继出现, 已经广泛应用到工农业生产、国民经济管理、国防及日常生活各个方面。

早在 19 世纪初, 人们就开始研究如何利用电信号进行信息的传送。1837 年美国的莫尔斯 (F. B. Morse) 发明了电报和莫尔斯电码, 这是人类第三代文化体系的开端 (第一代文化体系以语音语言为特征, 第二代文化体系以文字-纸张为标志, 第三代文化以电子电磁波介质与工具为标志), 使用了新创造的通信工具、新约定的通信信码、新的传播介质、新的传播速度, 其技术特征与技术优势非常突出。1876 年, 贝尔 (A. G. Bell) 发明了电话, 直接将语音转换成电信号沿导线传送, 后来爱迪生又对电话作了进一步的改进。1887 年, 赫兹通过实验证明麦克斯韦预言的电磁波的确存在, 它可以在空中传播, 速度与光相同。意大利青年马可尼 (Guglielmo Marconi) 读了赫兹的论文后, 萌发了用电磁波进行通信的念头。1894 年, 20 岁的马可尼制成第一台无线电通信器, 可以隔两英里通信, 1901 年实现了横跨大西洋的无线电通信, 同年在英国和纽芬兰之间实现相距 2700 公里的通信, 从此无线电信号的通信方式得到了广泛应用和迅速的发展。1906 年, 美籍加拿大人费森登 (R. A. Fessenden, 1866—1932) 发明了无线电话。1950 年美国在纽约和芝加哥市之间建造了一条容量为 480 路电话的微波接力通信电路, 开始进行微波通信; 1962 年美国发射电信卫星一号, 把电视信号从美国传到欧洲, 同时还可以传送 600 路无线电话; 1965 年美国发射了国际通信卫星一号, 1980 年美国发射第一颗全数字网络通信卫星 (商业通信卫星)。现在人们已经可以很方便地使用卫星完成个人通信、定位、远程教育等工作。如以卫星通信技术为基础构成的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS), 可以利用无线电信号的传输来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。目前迅速发展的综合业务数字网 (Integrated Services Digital Network, ISDN) 与国际互连网络 (Internet) 以及各种信息网络技术, 为将来实现所谓的“全球通信网”提供了条件。这将克服信号的传输距离、时间、语言等方面的障碍, 与个人通信技术相结合, 构成无所不在的智能化的全球通信网。

随着信号传输理论与技术的发展, 信号处理的理论与技术发展也很迅速。信号处理就是对信号进行某种加工或变换。其目的主要是削弱信号中多余的信号, 滤除混杂的噪声和干扰信号; 或者将信号变换为容易识别与分析的形式, 便于估计或选择它的特征参量。随着计算机技术的快速发展, 大大促进了对信号处理的研究, 使得信号处理的应用遍及许多科学技术领域。如月球探测器发回的图像信号可能被淹没在噪声中, 可以利用信号处理技术使有用的信号得到增强, 以得到清晰的图像; 资源勘探、地震测量以及核试验监测中所得到的数据分析需要利用信号处理技术。此外, 信号处理技术还可以应用于心、脑电图分析, 语音与图像识别以及各种类型的数据通信等方面。信号传输与信号处理有着密切的联系, 又是相对独立的学科体系, 但它们共同的理论基础就是信号与系统分析。

信号研究的主要内容有两方面: 研究信号的解析表示、信号有用性能的数值特征、信号的变换和处理 (即信号分析); 对给定的系统要求, 设计或选择信号的最佳形式 (即信号综合)。因此, 信号分析是信号综合的基础。本书主要讨论信号分析问题。

### 1.1.2 系统的有关概念

信号的产生、传输和处理需要一定的物理装置, 这样的物理装置常称为系统 (System)。

一般而言,系统的含义极其广泛,其中包括物理系统和非物理系统,人工系统和自然系统。广义上,系统是指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,如自动控制系统,通信系统,水电站自动发电系统,机械系统,以及交通运输,生产管理,经济管理,人体的神经系统,自然界中水的循环系统,银河系等。

系统的基本作用是对输入信号进行加工和处理,将其转换为所需要的输出信号。如图 1-1 所示,系统的输入信号  $r(t)$  称为激励,输出信号  $c(t)$  称为响应。从信号与系统分析的角度来看,系统就是一个信号变换器。

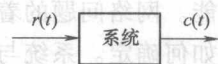


图 1-1 系统框图

在无线电电子学领域,信号与系统之间联系十分密切。人们经常利用通信、控制与计算机系统等进行信号的传输与处理。信号的传输与处理是由许多功能不同的单元组合而成的一个复杂系统来完成的。从广义上说,一切信息的传输过程都可以看做通信,一切完成信息传输任务的系统均称为信息传输系统,也可称为通信系统,如电话、电报、电视、雷达及导航等系统。电视信号传输的信息包括在配有声音的画面之中,当传输这些画面时,首先要借助于电视摄像机把画面的光线转换成图像信号,并利用话筒把声音转换成伴音信号,这些信号就是电视要传输的原始信号;再由天线将这个射频电视信号转换为电磁波发射出去,在空间传播;用户用电视接收天线截获其中一小部分电磁波能量,把它转换成射频信号送入电视接收机。接收机的作用正好与发射机相反,它能将送入的射频电视信号恢复成原有的图像信号和伴音信号,并把这两种信号分别送入显像管和喇叭,使用户能看到传输的画面并听到配有的伴音。其整个信息传输过程如图 1-2 所示。



图 1-2 通信系统组成框图

图 1-2 表示一般通信系统的组成,其主要部件有:

**信源**是产生载有信息的信息(语言、文字、图像及数据等)的设备或人。

**输入/输出转换器**:输入转换器是把消息转换为电信号,如摄像机、话筒等;输出转换器是把电信号还原成消息的装置,如显像管、喇叭等。由于这些装置具有将一种形式的能量转换为另一种形式能量的功能,所以也常称为换能器。

**发射机**:把输入转换器输出的信号转换成便于传输的另一种形式信号的装置。

**接收机**:接收信道传输来的信号,并把它转换成便于输出转换器工作的另一种形式信号的装置。

**信道**:信号传输的通道。在有线电话中它是一对导线;在利用电磁波的无线电通信中,它可以是空间卫星通信中的人造卫星,也可以是波导或同轴电缆;在近来的光通信中,它则是光导纤维。有时发射机和接收机也可看成是信号的通道(称为信道机)。

**信宿**:接收消息的装置或人。

构成系统的单元可大可小,可简可繁。 $RLC$  电路就是一个具有一定微积分功能的简单系统;而由通信系统、控制系统、计算机系统与指挥系统共同组合而成的宇宙航行系统,则是一个复杂的综合系统。通常无线电电子学领域中,系统的主要部件包括大量的多种类的电

路。电路也称网络，当研究一般性的抽象规律时，往往用网络一词，而讨论指定的具体问题时，则常称之为电路。在一定意义上，系统与电路或网络是同义词。电路和网络就是一个系统。系统所关心的是，对于给定的信号形式和传输与处理的要求，系统能否与之相匹配，系统为此而需要具有怎样的功能和特性，系统的核心是输入和输出之间的关系或者运算功能。网络问题的着眼点在于，为实现系统的功能与特性，网络应具有怎样的结构，各种参数如何确定。系统与网络的差异，主要体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度方面。系统问题侧重于注意全局，而网络问题则侧重于关心局部。如简单的  $RLC$  电路，在网络分析中主要研究各支路和回路的电流或电压，而在系统分析中则确定它如何构成具有积分或微分功能的运算器。随着大规模集成电路技术的快速发展，各种极其复杂的网络系统可以直接放在一个很小的集成电路芯片上，使得系统、网络、电路以及器件之间的差别日益缩小。通常认为系统比网络复杂，是规模更大的网络组合，但实际上却很难从复杂程度或规模大小来区分网络和系统。

系统理论主要研究两类问题：分析与综合。系统分析是对给定的具体系统，求出它对于给定激励的响应；系统综合是根据实际提出的对给定激励和响应的要求，设计出满足要求的系统。分析与综合各有不同的方法，但二者紧密相关，分析是综合的基础。本书主要讨论线性时不变系统的分析问题。

## 1.2 信号的分类与基本特性

### 1.2.1 信号的描述

信号是信息的一种物理体现。它一般是随时间或位置变化的物理量。信号按物理属性分为电信号和非电信号，它们可以相互转换。所谓电信号，一般是指载有信息的随时间而变化的电压或电流，它既可以是电阻上的电流、电容上的电荷、线圈中的磁通以及空间中的电磁波，也可以数字信号；而力、位移、加速度、温度等则属于非电信号。如水电站运行中的水轮发电机组及其控制与辅助设备，会产生各种电量与非电量信号，如电气方面的电压、电流、功率、频率、相位等电量信号，水力方面的压力、流量、流速、水位等非电量信号，以及机械方面的力、力矩、位移、振动、转速等非电量信号，控制设备方面的工作状态、故障、开关或阀门的位置、主备用设备切换等电量与非电量信号。电信号容易产生，便于控制，易于处理。本书着重研究电信号的各种特性和分析方法。

描述信号的特性，主要有两种常用的方法：时间特性法（又称时域特性法）和频率特性法（又称频域特性法）。对于电信号，它是随时间而变化的电量。描述信号的数学表达式是时间的函数，将该函数的图形称为信号的波形。该波形表现出信号的时间特性，如信号出现的时间先后，持续的时间长短，重复周期的大小以及随时间变化的快慢等。在本书中，“信号”与“函数”两词常相互通用，但严格来说，函数可以是多值的，而信号却是单值的。同时，任意信号总可以分解为许多不同频率的正弦分量信号，表现出信号具有一定的频率特性，如各频率的正弦分量之间相对大小，主要频率分量占有的范围及频带宽度等。不同的信号，主要在于它们有各自的时间特性和频率特性。为了分析复杂的信号，有时还用正交变换以及其他方式来描述信号。

## 1.2.2 信号的分类

信号的形式多种多样,可以从不同的角度进行分类。如按照时间自变量是否连续取值,可分为连续时间信号和离散时间信号;按照信号的能量特性可分为能量信号和功率信号等。下面介绍几种常见的信号分类方法。

### 1. 连续时间信号与离散时间信号

对于信号  $f(t)$ ,若其自变量  $t$  是连续变化的,则信号  $f(t)$  称为连续时间信号(简称连续信号)。如电路中的电压与电流,空中的电磁波,汽车行驶的位置与速度,机械系统中的力与力矩,通过水库闸门水流的流量与流速,声音信号,心电图与脑电图等都是常见的连续时间信号。

在某一时间间隔内,对于任意时间  $t$  值(除若干不连续点外),连续信号  $f(t)$  都有确定的函数值,如图 1-3 所示的正弦波和矩形波,在  $-\infty < t < \infty$  时间间隔内,都是连续信号(本书凡没有标明时间区间时,均默认其定义域为  $-\infty < t < \infty$ )。在图 1-3a 中  $t < 0$  和图 1-3b 中  $t < 0$  与  $t > t_0$  的范围内的信号值均为零,并且图 1-3b 中在  $t=0$  与  $t=t_0$  处存在两个不连续点。连续信号的幅值可以是连续的,既可以是任何实数,如图 1-3a 所示;也可以是离散的,即只能取有限个规定的数值,如图 1-3b 所示。对于时间和幅值都是连续的信号,又称为模拟信号,如图 1-3a 所示。

对于信号  $f(t)$ ,若其自变量  $t$  为  $t_n$  ( $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) 时是离散变化的,则  $f(t_n)$  称为离散时间信号(简称离散信号)。如数字计算机就是典型的离散时间信号的例子。

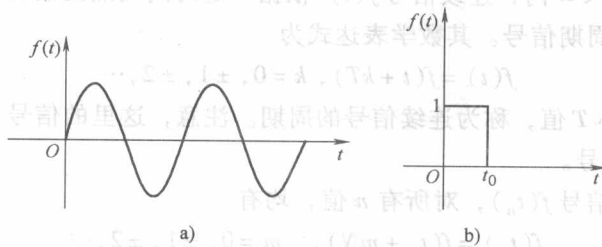


图 1-3 连续时间信号

a) 正弦波 b) 矩形波

对于离散信号的时间函数,只在某些不连续的规定瞬时给出函数值,在其他时间,函数没有定义。如图 1-4a 所示,函数  $f(t_n)$  只在  $t_n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$  等离散时刻分别给出函数值  $\dots, 1.3, -1.7, 2, 3, 1, 4.1, -2.5, \dots$  等,此时的函数幅值可取任何实数。离散时间间隔一般是均匀的( $t_n$  可简写为  $n$ ,对于该信号常称为序列,本书以  $f(n)$  表示),也可以是不均匀的。如果离散信号的幅值是连续的,即幅值可取任何实数,如图 1-4a 所示,则称为抽样信号。如果离散信号的幅值只能取某些规定的数值,如图 1-4b 所示,则称为数字信号(数字信号通常是指将模拟信号在时间上和幅值上都经过量化后得到的信号,常与模拟信号相对应,试比较二者的不同之处)。

### 2. 确定信号和随机信号

可以用确定时间函数(或序列)表示的信号,称为确定信号或规则信号。对于这种信号,给定某一时刻后,就能确定一个相应的信号值,如正弦信号。

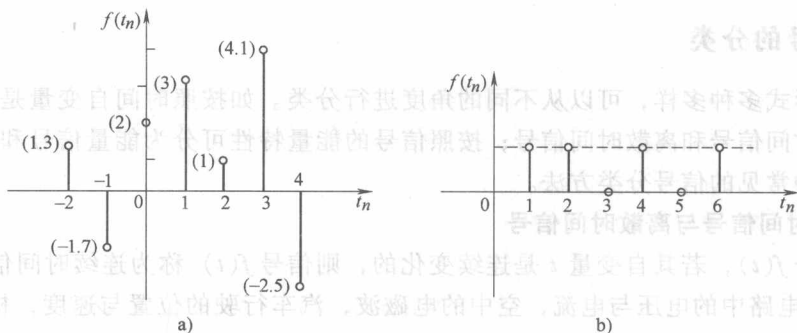


图 1-4 离散时间信号

a) 抽样信号 b) 数字信号

然而，实际传输的信号往往具有不可预知的不确定性，这种信号不能用确切的函数描述，它在任意时刻的取值都具有不确定性，事先将无法预知它的变化规律，这类信号称为随机信号或不确定信号。如语音信号、电子系统中的起伏热噪声、雷电干扰信号等，就是典型的随机信号。严格地说，由于噪声和干扰的影响，任一实际系统的输出信号都不可能是确定信号，要用概率统计的方法对随机信号进行研究。但是，研究确定信号仍是十分必要的，它不仅广泛应用于系统分析与设计中，也是研究随机信号的基础。本课程只讨论确定信号。

### 3. 周期信号和非周期信号

对于确定信号，又可分为周期信号和非周期信号。

在定义域  $-\infty < t < \infty$  内，连续信号  $f(t)$  依据一定时间间隔无始无终地重复某一变化规律，则称  $f(t)$  为连续周期信号。其数学表达式为

$$f(t) = f(t + kT), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1)$$

满足式 (1-1) 的最小  $T$  值，称为连续信号的周期。注意，这里的信号  $f(t)$  为连续函数，如图 1-3a 中的正弦波信号。

如果信号为离散信号  $f(t_n)$ ，对所有  $n$  值，均有

$$f(t_n) = f(t_n + mN), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-2)$$

则称  $f(t_n)$  为离散周期信号或周期序列。满足式 (1-2) 的最小  $N$  值，称为离散信号  $f(t_n)$  的周期。

非周期信号的幅值在时间上不具有周而复始变化的特性，它不具有周期  $T$  值，或者周期  $T$  值看作无限大。实际上，真正的周期信号是不存在的。因此，所谓的周期信号只是指在相当长的时间内，按某一规律重复变化的信号。

### 4. 一维信号和多维信号

按照信号自变量数目的不同，信号可分为一维信号和多维信号。

如果信号的自变量只有一个，这种信号称为一维信号。如  $\sin t$ 、 $e^t$  等，可以用具体的函数表达式表示，也可用时间函数  $f(t)$ 、 $y(t)$  等抽象的函数表达式表示，还可用波形图或数据表来表达。注意这里自变量  $t$  的定义域很重要，它表示了信号存在的范围，如  $\sin t$  ( $-\infty < t < \infty$ ) 和  $\sin t$  ( $t > 0$ ) 就是两个不同的信号，因为它们的时间范围不同。

凡是具有两个及以上自变量的信号，称为多维信号。如电视图像信号  $f(x, y, t)$  就是典型的三维信号，它是平面空间  $x, y, t$  的三维函数。对于多维信号，可以采取扫描等措施

变换为一维信号。

### 5. 能量信号和功率信号

按照信号的能量和功率是否有限的特点, 可以将信号分为能量有限信号和功率有限信号(简称功率信号)。

这里, 不妨设信号  $f(t)$  为电压或电流信号, 将该信号加载在  $1\Omega$  电阻两端上, 这时提供给该电阻的瞬时功率为  $|f(t)|^2$ 。在时间区间  $\left(-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2}\right)$  内消耗的能量为  $\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt$ ,

把该能量对时间区间取平均值, 即得信号在该区间内的平均功率为  $\frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt$ 。基于此, 把时间区间拓展到无限区间  $(-\infty, \infty)$ , 对于连续信号  $f(t)$ , 定义其能量为在该区间的平均能量, 即

$$E \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (1-3)$$

定义其功率为在该区间的平均功率, 即

$$P \triangleq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} |f(t)|^2 dt \quad (1-4)$$

对于离散信号  $f(n)$ , 定义其能量为

$$E \triangleq \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f(n)|^2 \quad (1-5)$$

定义其功率为

$$P \triangleq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |f(n)|^2 \quad (1-6)$$

仔细观察式(1-3)~式(1-6)知, 都是对信号  $f(t)$  或  $f(n)$  模的平方求和, 所以信号能量  $E$  和功率  $P$  均为非负实数, 即使信号  $f(t)$  或  $f(n)$  为复数也是如此。

由此可作如下定义: 如果在无限大时间区间内, 信号  $f(t)$  的能量为有限值(此时平均功率  $P=0$ ), 该信号  $f(t)$  被称为能量有限信号(简称能量信号)。如果在无限大时间区间内, 信号  $f(t)$  的平均功率为有限值(此时信号能量  $E=\infty$ ), 则该信号  $f(t)$  被称为功率有限信号(简称功率信号)。

根据上述定义, 有限时间内的信号必定是能量信号。周期信号是功率信号, 而非周期信号可以是能量信号, 也可以是功率信号。对于能量信号, 其平均功率为零, 故只能从能量观点方面去研究。对于功率信号, 由于能量为无限大, 则只能从功率观点方面去研究。

### 6. 实信号和复信号

物理上可实现且取值为实数的信号, 称为实值信号, 简称为实信号。如正、余弦信号(或序列), 在各时刻的取值为实数。实信号的共轭对称信号为其本身。

取值为复数的信号, 称为复值信号, 简称为复信号。复信号没有实际物理意义, 主要是为了理论分析的需要才引进复信号概念, 后面将要介绍的复指数信号便是如此。

### 7. 奇信号和偶信号

对于连续信号  $f(t)$  或离散信号  $f(n)$ , 如果其波形图关于纵坐标轴对称, 即有

$$f(t) = f(-t) \quad (1-7)$$

或

$$f(n) = f(-n) \quad (1-8)$$

此时, 则称信号  $f(t)$  或  $f(n)$  为偶信号。

同理, 对于信号  $f(t)$  或  $f(n)$ , 如果其波形图关于坐标原点对称, 即有

$$f(t) = -f(-t) \quad (1-9)$$

或

$$f(n) = -f(-n) \quad (1-10)$$

此时, 则称信号  $f(t)$  或  $f(n)$  为奇信号。

凡不具有上述奇偶特性的信号, 均称为非奇非偶信号。

### 8. 因果信号和非因果信号

对于连续信号  $f(t)$ , 如果仅在  $t \in [0, \infty)$  区间内  $f(t)$  取非零值, 而在  $t \in (-\infty, 0)$  区间内  $f(t)$  均取零值, 则称这样的信号  $f(t)$  为因果信号。

反之, 如果在  $t \in [0, \infty)$  区间内  $f(t)$  取值均为零, 而在  $t \in (-\infty, 0)$  区间内  $f(t)$  取非零值, 则称这样的信号为反(逆)因果信号或非因果信号。

显然, 如果一个信号在  $t \in (-\infty, \infty)$  区间内都存在非零值, 那么这个信号便可表示成一个因果信号和一个反因果信号之和。

同理, 对于离散信号  $f(n)$ , 分别有因果序列、反因果序列之分。

除上述介绍的 8 种信号外, 还有调制信号、载波信号与已调波信号等, 以后逐步介绍。

## 1.2.3 信号的基本特性

信号的基本特性是指其时间特性、频率特性、能量特性与信息特性。

确定信号是一个确定的时间函数, 它的数学表达式或波形都集中体现了信号的时间特性。如信号持续时间的长短, 变化速率的快慢, 信号幅值与相位的大小以及随时间改变而呈现出来的变化规律等。

一般地, 一个复杂信号可以分解为多个不同频率的正弦分量的线性组合, 其中每个分量都具有各自的振幅和相位。按照频率高低表示各正弦分量振幅和相位大小的图形称为信号的频谱。一般地, 信号的能量主要集中在低频分量上, 把集中主要能量的一定频率范围称为信号的频带宽度。频谱是信号在频率域的一种表示形式, 它集中体现了信号的频率特性, 包括信号的频带宽度和各正弦分量振幅、相位随频率的分布情况等。

任何信号在系统中传输时都带有一定的能量或功率, 这表明信号具有能量或功率特性。前面对信号的能量和功率概念在时间域上进行了定义, 同样在频率域上也可以定义, 即信号的能量或功率随频率变化的函数关系, 称为信号的能量谱和功率谱。利用能量谱可以定义非周期信号的近似持续时间和频带宽度。此外, 对于实际系统, 总会存在或多或少的噪声干扰, 为了保证有用信号的有效传输, 一般要求有用信号的功率电平大于噪声的功率电平。

对于随机信号, 它是不规则信号, 但它仍具有某些可以预期的统计规律, 可以用一些统计特征如均值、方差、相关函数和协方差函数等给予描述。

确定信号与随机信号具有一个共同特征, 就是信号可以携带或含有一定的信息。人们利用各种系统对信号进行传输、处理和加工, 其目的就是为了获取其中有用的信息。这些有用的信息往往体现在信号某些属性或参数的变化之中。如在电报传输系统中, 持续时间长短不

一的脉冲序列信号代表不同的电报数码，分组数码表示不同的报文信息；又如收音机天线回路接收到的无线电广播信号中，高频信号的幅度或频率变化就携带了有用的广播节目信息等。在后面的章节中，主要介绍确定信号的时间特性和频率特性。

### 1.3 典型信号

对于连续时间信号，常见的典型信号分为基本信号与奇异信号两类。对于那些经常遇到的而且是构成其他很多信号基本单元的信号，称为基本信号，主要有复指数信号、抽样信号、钟形信号等；对于那些本身有不连续点（跳变点）或其导数与积分有不连续点的信号，称为奇异信号，主要有斜坡信号、阶跃信号、符号函数、冲激信号与冲激偶信号等。

#### 1.3.1 基本信号

##### 1. 复指数信号

复指数信号可以概括表示直流信号、实指数信号、正余弦信号、复指数信号。即

$$f(t) = Ke^{st}, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-11)$$

式中， $K$  为实常数； $s$  为复数， $s = \sigma + j\omega$ 。

根据上式中  $s$  取值的不同，可以有以下几种具体表示形式。

(1) 直流信号 当  $\sigma = 0$ 、 $\omega = 0$  时，有  $s = 0$ ，式(1-11)变为

$$f(t) = K, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-12)$$

此时的  $f(t)$  为直流信号，其波形如图 1-5a 所示。

(2) 实指数信号 当  $\sigma \neq 0$ 、 $\omega = 0$  时， $s$  为实数，式(1-11)变为

$$f(t) = Ke^{\sigma t}, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-13)$$

此时的  $f(t)$  为实指数信号。式中  $\sigma$  反映了信号的幅度随时间衰减 ( $\sigma < 0$ ) 或增加 ( $\sigma > 0$ ) 的速度。当  $\sigma = 0$  时， $f(t)$  就成为直流信号。系数  $K$  是  $t = 0$  时刻实指数信号的初始值。其波形如图 1-5b 所示。为表示实指数信号随时间变化的快慢程度，定义

$$\tau = \frac{1}{|\sigma|} \quad (1-14)$$

式中， $\tau$  称为实指数信号的时间常数。

当  $\sigma < 0$  且  $t = \tau = \frac{1}{|\sigma|}$  时，式(1-13)变为

$$f(t) = Ke^{-1} = 0.368K$$

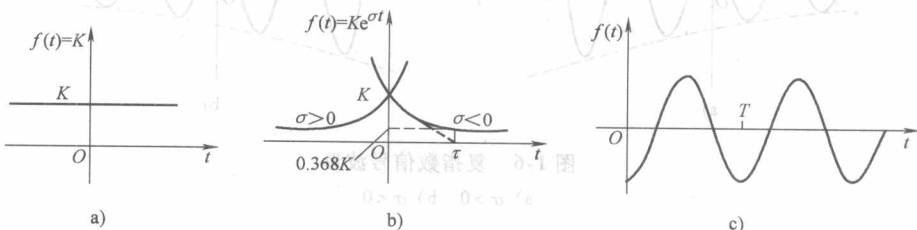


图 1-5 直流信号与实指数信号波形

a) 直流信号 b) 实指数信号 c) 正弦信号



这表明实指数信号当  $t = \tau$  时刻, 信号幅值衰减到初始值的 36.8%。显然,  $|\sigma|$  越大,  $\tau$  就越小, 信号幅值衰减就越快。同理, 当  $\sigma > 0$  时,  $|\sigma|$  越大,  $\tau$  就越小, 信号幅度增长就越快。这里必须指出, 指数信号的一个最重要特性是其经积分或微分变换后仍是指数信号。

(3) 虚指数信号与正余弦信号 当  $\sigma = 0$ 、 $\omega \neq 0$  时,  $s = j\omega$  为虚数, 式 (1-11) 变为

$$f(t) = Ke^{j\omega t}, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-15)$$

此时的  $f(t)$  为虚指数信号。

此外, 还可根据欧拉 (Euler) 公式  $e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t$ , 将上式变为

$$f(t) = K\cos\omega t + jK\sin\omega t, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-16)$$

显然, 式 (1-16) 中的实部和虚部分别为

$$\operatorname{Re}[f(t)] = K\cos\omega t, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-17)$$

$$\operatorname{Im}[f(t)] = K\sin\omega t, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-18)$$

因此, 分别称  $\operatorname{Re}[f(t)]$  与  $\operatorname{Im}[f(t)]$  为余弦信号与正弦信号。由于二者相位差为  $\pi/2$ , 故通称为正弦信号 (或余弦信号)。式 (1-17) 可变为

$$\operatorname{Re}[f(t)] = K\sin(\omega t + \theta), \quad -\infty < t < \infty \quad (1-19)$$

式中, 初相位角  $\theta = -\pi/2$ , 周期  $T = 2\pi/\omega$ , 其波形等幅振荡, 如图 1-5c 所示。

同样, 利用欧拉公式, 可得正、余弦信号的指数表示式为

$$\sin\omega t = \frac{1}{2j}(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) \quad (1-20)$$

$$\cos\omega t = \frac{1}{2}(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \quad (1-21)$$

显然, 正弦信号经积分或微分变换后仍是同频率的正弦信号, 仅相差一个相位角。

(4) 复指数信号 当  $\sigma \neq 0$ 、 $\omega \neq 0$  时,  $s$  为复数, 式 (1-11) 变为

$$f(t) = Ke^{(\sigma + j\omega)t} = Ke^{\sigma t}\cos\omega t + jKe^{\sigma t}\sin\omega t, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-22)$$

分析式 (1-22) 可知, 当  $\sigma > 0$  时, 信号  $f(t)$  的实部与虚部分别为增幅振荡的余弦与正弦信号; 反之, 当  $\sigma < 0$  时, 信号  $f(t)$  的实部与虚部分别为减幅振荡的余弦与正弦信号。它们的波形如图 1-6 所示。

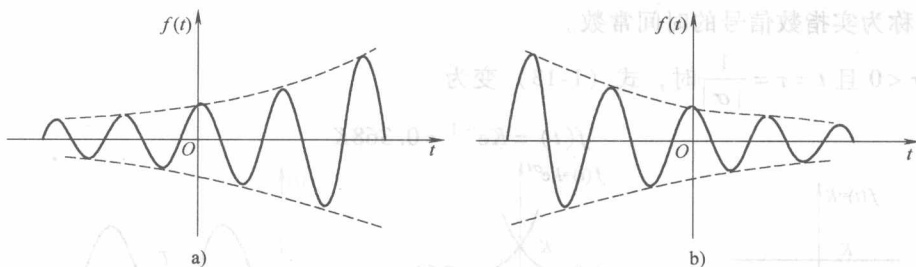


图 1-6 复指数信号波形

a)  $\sigma > 0$  b)  $\sigma < 0$

这里需注意, 复指数信号仅有数学上的意义, 实际上是不存在的。但是在信号分析中, 复指数信号已成为简化信号运算与分析的有力工具。