



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

周浩敏 王 睿 编著

# 测试信号处理技术

(第2版)

 北京航空航天大学出版社

TN911.6/53=2

2009



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 测试信号处理技术

## (第2版)

周浩敏 王 睿 编著

北京航空航天大学出版社

## 内容简介

本书是2004年出版的《测试信号处理技术》的第2版。全书基本内容仍为信号分析与处理的理论知识,主要包括:连续和离散时间信号的频谱分析,模拟和数字滤波器的设计原理和方法,同时介绍了随机信号分析、现代信号处理技术的基本概念和基本分析方法。本书以连续时间信号的分析处理为基础,以数字信号处理为重点,不要求以“信号与系统”为先修课程。

本书共分8章,包括:概论,信号分析和处理基础,离散时间序列及其 $z$ 变换,离散时间信号分析,数字滤波基础,数字滤波器,随机信号分析基础,现代信号处理技术。

本书是“十一五”国家级规划教材,可作为测控技术与仪器、信息工程、探测制导与控制、自动化、精密仪器、电器工程和机电工程等大学本科专业的教科书,也可作为相关专业工程硕士的教材以及从事相关专业的工程技术人员学习信号分析与处理技术的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

测试信号处理技术/周浩敏,王睿编著. —2版. —北京:

北京航空航天大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-81124-620-9

I. 测… II. ①周…②王… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第037017号

## 测试信号处理技术(第2版)

周浩敏 王 睿 编著

责任编辑 刘晓明

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpres@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:41 字数:918千字

2009年5月第1版 2009年5月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-620-9 定价:64.00元

## 第2版前言

本书第1版自2004年出版以来,经过了5年5届学生的教学实践;同时,将它直接作为教材使用的本科专业学生,已从原来面向自动化专业自动测试与控制方向的本科生,扩展到测控技术与仪器、信息工程以及探测制导与控制3个本科专业的本科生。专业面向的进一步扩大,特别是学科建设的快速发展,对这一课程的内容提出了一些新的要求;另外,考虑到信号分析与处理的理论、原理、方法、技术及其应用领域的高速拓展和发展,有必要在保证课程基础理论、原理相对稳定的同时,融入体现时代气息的新内容,这也是创新人才培养的需要。本书第1版有幸被评为北京市高等教育精品教材,在此基础上,我们又借其作为“十一五”国家级规划教材推出的契机,在原书基本框架保持不变的前提下,对全书内容作了较大幅度的更新和修订,主要包括:

① 删掉了“实时信号处理及其系统概述”与“非平稳状态的系统分析”两节。

② 引入了二维傅里叶变换、分数傅里叶变换、希尔伯特变换(包括希尔伯特-黄变换)、沃尔什变换、分形变换、主成分分析法以及粒子滤波等基本概念,其中分数傅里叶变换、希尔伯特-黄变换、分形变换、主成分分析和粒子滤波这些新的内容,无论是理论本身还是其应用,都还在研究和发展中,将其反映到教材中,无疑是一种尝试。这些内容不一定都需要在课程中讲述(某些内容根据具体情况也是可选用的),但对于开拓学生视野,学习其他相关课程,帮助学生的课外科技实践以及继续深造或者毕业后从事相关的技术工作,这些内容是有益的和必需的。由于这些内容涉及的数学基础知识对于本科学生来说不一定都学习过,所以在编写教材时,作了相应的补充,力求本科生能够自学,看得懂,能正确理解,需要时可以用得上。

③ 增加了一些特色内容,例如“相关检测在硅谐振式微传感器动力学特性检测中的应用”一节,是相关检测技术在科研课题中的实际应用,根据我们的体会,对于从事测控系统和测试专业学习和工作的学生以及技术人员来说,深刻理解、掌握相关检测及类似的锁相技术是有必要的;同时通过这方面的深入实际的介绍,希望能对读者起到联想和启发的作用。



④ 改进了第1版中(包括习题)的错误和表述上的不当之处。例如奈奎斯特抽样定理,原来的表述为:“对于带限信号,抽样信号能无失真地恢复原信号的条件是抽样频率要大于或等于信号最高频率的2倍”。严格来说,“等于”两个字是不恰当的,应当去掉,因为对于某些正弦信号,若抽样频率等于信号最高频率的2倍,则抽样的结果是零,是不可能恢复原信号的。在奥本海默著的《信号与系统》一书中对抽样定理的表述,也只有“大于”,而没有“等于”两字。

当然,信号抽样频率等于信号最高频率的2倍时,不产生频谱混叠的结论则仍然是正确的。

⑤ 根据内容的调整,增加了一些例题,书中所有应用 Matlab 的例题,全部重新通过了调试,并对所得到的图形作了新的处理。

本书承蒙北京航空航天大学自动化学院李行善教授审阅,他对书稿字斟句酌,提出了许多宝贵的意见和建议,体现了李行善教授治学严谨的科学态度,据此我们作了相应的修改,在此向李行善教授表示衷心的感谢和敬意。

虽然我们认真地做了不少工作,但由于能力有限,仍然可能存在许多问题,有些内容的选择是否妥当,也没有充分的把握,希望读者批评指正。

编 者

2008年11月

## 第 1 版前言

为了适应信息技术的迅速发展和学科建设的需要,北京航空航天大学出版社于 2001 年正式出版了《信号处理技术基础》一书。由于这本教材针对自动化、测控技术与仪器、机电工程等专业的学生没有学过“信号与系统”课程的具体情况,取材合理,内容深入浅出,重点安排得当,受到了学生的欢迎。随着学科专业的调整、改革和发展的需要,以及新的教学大纲的实施,特别是对于仪器科学学科专业本科生来说,信息的获取和处理所需的有关信号处理技术显得愈来愈重要了,无论在内容的深度上还是广度上都需要对《信号处理技术基础》一书作较大调整。为此,除个别章节外,我们对《信号处理技术基础》重新进行了编写,增加了许多新的包括现代信号处理技术的内容,对“思考与练习题”的习题部分,给出了参考答案,增加并调整了部分例题,书名也相应改为《测试信号处理技术》。当然,本书仍保持了《信号处理技术基础》中既重视数学原理的系统性和逻辑性,又强调概念的物理意义,以利于读者自学的风格和特色。

这本新教材仍然不要求学生先修“信号与系统”课程,并仍以确定性信号的分析与处理为主要研究对象,但内容更为精炼,对深度和要求作了相应的调整,增加了“逆卷积”一节。另外,随机信号的分析、现代信号处理技术相比《信号处理技术基础》的分量明显增加,这对于学习或从事信息的获取、分析处理技术的人们来说,是有用的,也是需要的。由于 Matlab 软件平台信号处理的功能强大,根据我们在教学中的体会,其普及程度比前几年有了明显提高,因此要求大部分学生应能使用 Matlab 编程,解决学习和实践中有关信号分析和处理方面的问题。本书为此增加了对 Matlab 符号运算工具箱中有关傅里叶变换、拉普拉斯变换和  $z$  变换计算的应用以及数字滤波器设计和分析工具 FDATool 的介绍。

在教材编写过程中,考虑了北京航空航天大学专业调整后的特点,又进一步参考了国内外许多新出版的相关教材与参考书,总结了近年来从事信号分析与处理课程的教学实践。从篇幅上来看,它比《信号处理技术基础》略有增加,全部内容,包括 3 次上机作业,大约需要 60 学时。选用本教材的教师应根据实际需要与可能,组织安排教学。



全书共分8章,内容安排如下:

第1章,概论,介绍了与信号、信号分析和处理、信号运算等相关的概念。

第2章,信号分析和处理基础,讲述连续时间信号的时域和频域分析,重点是频域分析,包括周期信号、非周期信号、抽样信号的傅里叶分析,信号的能量谱和功率谱等,以建立信号频谱分析的基本概念,为全书的学习奠定基础。

第3章,序列及其 $z$ 变换,是进一步讨论离散时间信号的基础知识。

第4章,离散时间信号分析,实际上是数字信号分析的基本内容,是本书的重点之一,包括:序列傅里叶变换 DTFT,离散傅里叶级数 DFS,离散傅里叶变换 DFT,信号的拉普拉斯变换、傅里叶变换和 $z$ 变换之间的关系,快速傅里叶变换 FFT 及其应用,逆卷积的求解方法。

第5章,数字滤波基础,主要包括:离散时间系统的基础知识,模拟滤波器的设计方法及其实现。

第6章,数字滤波器,主要讨论数字滤波器的特性、数字滤波器的设计方法及其结构实现;讨论了无限冲激响应数字滤波器设计的冲激响应不变法和双线性变换法,有限冲激响应滤波器的窗口法和频率抽样法,适当介绍了等波纹优化设计的方法。

第7章,随机信号分析,介绍了连续和离散时间随机信号的基本概念,时、频域中的数字特征,平稳随机信号通过线性系统的分析,最小均方误差滤波技术,确定性信号的相关分析和检测。

第8章,现代信号处理技术,专门介绍了短时傅里叶变换及时-频域分析,小波变换及小波分析基础,实时信号处理系统及相关技术。

本书第5章和第6章由王睿副教授编写,其余各章由周浩敏教授编写,并负责统编定稿。

本书初稿承蒙北京航空航天大学电子信息工程学院的殷瑞教授审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨表示衷心的感谢。根据他的意见和建议,编者对本书初稿作了认真的修改。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者指正。

编 者

2004年3月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 概 论                | 1  |
| 1.1 信息、消息和信号             | 1  |
| 1.2 信号分析和信号处理            | 8  |
| 1.3 基本的连续信号              | 14 |
| 1.4 连续时间信号的运算            | 24 |
| 思考与练习题                   | 27 |
| 第 2 章 信号分析和处理基础          | 29 |
| 2.1 系统分析与信号              | 29 |
| 2.1.1 连续时间系统的线性非移变特性     | 29 |
| 2.1.2 连续信号的时域分解          | 31 |
| 2.1.3 卷积法求系统零状态响应与卷积的性质  | 32 |
| 2.2 周期信号的频谱分析——傅里叶级数     | 34 |
| 2.2.1 正交函数               | 35 |
| 2.2.2 三角函数形式的傅里叶级数       | 36 |
| 2.2.3 指数形式的傅里叶级数         | 39 |
| 2.2.4 信号的重构和吉伯斯现象        | 48 |
| 2.2.5 周期信号的功率谱           | 51 |
| 2.3 非周期信号频谱分析——傅里叶变换     | 53 |
| 2.3.1 傅里叶变换              | 53 |
| 2.3.2 典型非周期信号的频谱         | 56 |
| 2.3.3 傅里叶变换的性质           | 60 |
| 2.4 周期信号的傅里叶变换           | 79 |
| 2.4.1 复指数及正弦、余弦信号的傅里叶变换  | 79 |
| 2.4.2 一般周期信号的傅里叶变换       | 80 |
| 2.4.3 周期信号与单周期脉冲信号频谱间的关系 | 81 |
| 2.5 能量谱                  | 82 |
| 2.6 抽样信号的傅里叶变换           | 87 |
| 2.6.1 时域抽样               | 88 |
| 2.6.2 频域抽样               | 91 |



|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 2.6.3 抽样定理                     | 92  |
| 2.7 拉普拉斯变换                     | 100 |
| 2.7.1 拉普拉斯变换的定义                | 100 |
| 2.7.2 常用信号的拉普拉斯变换与拉普拉斯变换的性质    | 103 |
| 思考与练习题                         | 105 |
| 第3章 离散时间序列及其 $z$ 变换            | 110 |
| 3.1 离散时间信号——序列                 | 110 |
| 3.1.1 序列                       | 110 |
| 3.1.2 基本序列                     | 111 |
| 3.1.3 序列的运算                    | 115 |
| 3.2 序列的 $z$ 变换                 | 118 |
| 3.2.1 $z$ 变换的定义                | 118 |
| 3.2.2 $z$ 变换的收敛域               | 119 |
| 3.2.3 典型离散时间信号(序列)的 $z$ 变换     | 125 |
| 3.3 $z$ 变换的性质                  | 128 |
| 3.4 $z$ 反变换                    | 135 |
| 3.4.1 围线积分法                    | 136 |
| 3.4.2 幂级数展开法                   | 138 |
| 3.4.3 部分分式展开法                  | 139 |
| 思考与练习题                         | 144 |
| 第4章 离散时间信号分析                   | 146 |
| 4.1 序列的傅里叶变换                   | 146 |
| 4.2 信号的傅里叶变换、拉普拉斯变换与 $z$ 变换的关系 | 152 |
| 4.3 离散傅里叶级数(DFS)               | 156 |
| 4.3.1 傅里叶变换在时域和频域中的对偶规律        | 156 |
| 4.3.2 离散傅里叶级数 DFS              | 158 |
| 4.4 离散傅里叶变换(DFT)               | 162 |
| 4.4.1 离散傅里叶变换 DFT 定义式          | 162 |
| 4.4.2 离散傅里叶变换 DFT 与序列傅里叶变换的关系  | 164 |
| 4.5 离散傅里叶变换的性质                 | 165 |
| 4.6 快速傅里叶变换(FFT)               | 171 |
| 4.6.1 DFT 直接运算的问题和改进思路         | 171 |
| 4.6.2 基2按时间抽取的 FFT 算法(时析型)     | 173 |
| 4.7 IDFT 的快速算法(IFFT)           | 179 |



|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 4.8          | FFT 的软件实现 .....           | 180        |
| 4.9          | 离散傅里叶变换的应用 .....          | 182        |
| 4.9.1        | 用 FFT 实现快速卷积 .....        | 183        |
| 4.9.2        | 连续时间信号的数字谱分析 .....        | 189        |
| 4.9.3        | FFT 在动态测试数据处理中的应用 .....   | 196        |
| 4.9.4        | FFT 在时变信号三维谱图分析中的应用 ..... | 202        |
| 4.10         | 二维与分数傅里叶变换 .....          | 205        |
| 4.10.1       | 二维傅里叶变换 .....             | 205        |
| 4.10.2       | 分数(阶)傅里叶变换 .....          | 212        |
|              | 思考与练习题 .....              | 235        |
| <b>第 5 章</b> | <b>数字滤波基础 .....</b>       | <b>240</b> |
| 5.1          | 线性非移变离散系统时域分析 .....       | 241        |
| 5.1.1        | 线性非移变离散系统 .....           | 241        |
| 5.1.2        | 离散系统的数学模型——差分方程的建立 .....  | 242        |
| 5.1.3        | 离散系统时域分析 .....            | 245        |
| 5.2          | 离散系统的 $z$ 域分析 .....       | 254        |
| 5.2.1        | 差分方程的 $z$ 变换解法 .....      | 254        |
| 5.2.2        | 离散系统的系统函数 .....           | 255        |
| 5.2.3        | 离散系统的频率响应 .....           | 259        |
| 5.3          | 逆卷积 .....                 | 268        |
| 5.3.1        | 时域逆卷积 .....               | 269        |
| 5.3.2        | 基于同态系统的逆卷积 .....          | 271        |
| 5.3.3        | 信号的倒谱分析 .....             | 275        |
| 5.4          | 模拟滤波器的基本概念及其设计方法 .....    | 277        |
| 5.4.1        | 基本概念 .....                | 278        |
| 5.4.2        | 信号通过线性系统无失真传输的条件 .....    | 280        |
| 5.4.3        | 滤波器的理想特性与实际特性 .....       | 281        |
| 5.4.4        | 模拟滤波器的一般设计方法 .....        | 285        |
| 5.5          | 模拟滤波器的设计 .....            | 289        |
| 5.5.1        | 巴特沃思滤波器 .....             | 289        |
| 5.5.2        | 切比雪夫滤波器 .....             | 297        |
| 5.5.3        | 频率变换 .....                | 307        |
|              | 思考与练习题 .....              | 312        |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第6章 数字滤波器</b>                | 316 |
| 6.1 数字滤波器的基本原理                  | 316 |
| 6.2 IIR 数字滤波器设计                 | 320 |
| 6.2.1 冲激响应不变法                   | 320 |
| 6.2.2 双线性变换法                    | 328 |
| 6.2.3 其他类型(高通、带通、带阻)IIR 数字滤波器设计 | 337 |
| 6.2.4 IIR 滤波器优化设计               | 344 |
| 6.3 FIR 数字滤波器设计                 | 347 |
| 6.3.1 FIR 数字滤波器的基本特征            | 348 |
| 6.3.2 窗口法设计 FIR 数字滤波器           | 355 |
| 6.3.3 频率抽样法                     | 361 |
| 6.3.4 等波纹滤波器设计                  | 370 |
| 6.4 滤波器设计和分析工具 FDA Tool         | 375 |
| 6.5 数字滤波器的实现                    | 382 |
| 6.5.1 软件实现与硬件实现                 | 383 |
| 6.5.2 数字滤波器的结构                  | 387 |
| 6.5.3 有限字长对数字滤波器实现的影响           | 399 |
| 6.5.4 数字滤波器类型选择原则               | 400 |
| 思考与练习题                          | 401 |
| <b>第7章 随机信号分析基础</b>             | 403 |
| 7.1 随机信号及其在时域的数字特征              | 403 |
| 7.1.1 随机信号                      | 403 |
| 7.1.2 连续随机信号的数字特征               | 405 |
| 7.1.3 各态历经连续随机信号的数字特征及其估计       | 411 |
| 7.1.4 离散随机信号的数字特征               | 416 |
| 7.1.5 各态历经离散随机信号的数字特征的估计        | 420 |
| 7.2 随机信号的频域描述                   | 421 |
| 7.2.1 连续时间随机信号的功率谱分析            | 421 |
| 7.2.2 随机序列的功率谱分析                | 425 |
| 7.2.3 功率谱估计                     | 430 |
| 7.3 平稳随机信号通过线性系统的响应分析           | 436 |
| 7.3.1 连续平稳随机信号通过线性非时变连续系统       | 437 |
| 7.3.2 平稳随机序列通过线性离散系统            | 440 |
| 7.3.3 相干检测                      | 443 |



|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 7.3.4 相关辨识 .....                     | 447        |
| 7.4 确定性信号的相关分析与检测 .....              | 453        |
| 7.4.1 确定性信号的相关函数 .....               | 454        |
| 7.4.2 信号的相关检测技术 .....                | 460        |
| 7.4.3 相关检测在硅谐振式微传感器动力学特性检测中的应用 ..... | 463        |
| 思考与练习题 .....                         | 472        |
| <b>第8章 现代信号处理技术</b> .....            | <b>474</b> |
| 8.1 几种重要的信号变换技术 .....                | 474        |
| 8.1.1 短时傅里叶变换及时-频域分析 .....           | 474        |
| 8.1.2 小波变换基础及小波分析 .....              | 479        |
| 8.1.3 分形理论简介 .....                   | 501        |
| 8.1.4 分形概述 .....                     | 504        |
| 8.1.5 分形在信号分析及处理中的应用 .....           | 515        |
| 8.1.6 沃尔什变换 .....                    | 538        |
| 8.1.7 希尔伯特变换 .....                   | 554        |
| 8.1.8 主成分分析法 .....                   | 566        |
| 8.2 现代滤波技术简介 .....                   | 572        |
| 8.2.1 维纳滤波 .....                     | 572        |
| 8.2.2 卡尔曼滤波 .....                    | 579        |
| 8.2.3 自适应滤波 .....                    | 588        |
| 8.2.4 粒子滤波器 .....                    | 594        |
| 思考与练习题 .....                         | 609        |
| <b>附录 4.9.4 小节中的参考源程序</b> .....      | <b>610</b> |
| <b>练习题参考答案</b> .....                 | <b>633</b> |
| <b>参考文献</b> .....                    | <b>641</b> |

# 第 1 章 概 论

基本内容:

- 信息、消息、信号
- 信号分析、信号处理
- 典型连续时间信号
- 连续时间信号的基本运算

## 1.1 信息、消息和信号

爱因斯坦的质能转换公式  $E=mc^2$ , 表示了宇宙间存在物质和能量及其相互转换的关系, 但宇宙中除了物质和能量以外, 还存在信息。有一种理论表明: 宇宙是一次大爆炸的产物, 爆炸产生了物质、能量, 同时也产生了信息, 因此, 信息存在的历史与物质、能量一样久远, 差不多有 150 亿年。但历史上相当长的时间中, 人们对信息的认识远不如对物质与能量的认识。现在, 人们已将物质、能量和信息称为客观世界的三要素, 世界由物质组成, 能量是一切物质运动的动力, 信息是人类了解自然及人类社会的依据。人类正逐渐进入信息社会, 获取、传输、交换和利用信息成为人类基本的社会活动。什么是“信息”, 如何获取并进行信息的传输、交换和利用, 就成为人们必须研究和特别重视的重大课题。

### 1. 信息、消息和信号

在信息技术领域, 信息(information)、消息(message)和信号(signal)是密切相关, 但是却不同的三个重要概念。

信息, 中文的译名有时也用“讯息”或“资讯”。人们对于信息的了解比对物质和能量晚了许多。信息到底是什么? 有人做过初步统计, 目前国内外已有超过 100 种信息的定义, 如果用关键词 information definition 在 Google 中进行搜索, 会有远超过 100 种信息定义的查询结果。但这从一个角度也反映出, 到目前为止, 还没有一个统一的为人们普遍认同的定义。因此有人干脆认为: 信息至今没有定义。而当今社会, 不仅自然科学, 而且包括社会科学在内, 信息已成了炙手可热的字眼。有人惊呼: 信息定义泛滥, 已呈“爆炸”趋势, 需要规范化、标准化, 需要“瘦身”。但无论如何, 信息确实需要有科学的定义。应当说, 对信息的共识是不同程度存在的, 但信息的科学定义仍在不断深化和完善的过程中。中国科学院编写的《21 世纪 100 个交叉科学难题》一书中已把“信息是什么”列入 100 个难题之中。2007 年, 全国科技名词审定委员会第一期中国科技术语中公布了包括信息在内的有关术语定义, 即信息是: 以适合于通



信、存储或处理的形式来表示知识或消息。但明确指出这个定义属于“试用”，并且是列在“通信科学技术名词”范畴中。针对这一现实情况，为了历史地、全面地认识信息的概念，下面从信息论的角度，引出几个代表性人物所提出的经典定义。

奈奎斯特(Harry Nyquist)1924年在《贝尔系统技术》(*Bell System Technical Journal*)杂志上发表的论文 *Certain factors affecting telegraph speed* (影响发报速度的某些因素)中认为：信号的波形和编码的选择是影响讯息(当时他采用 intelligence 表达)传输速度的两个决定性因素，并提出：讯息的传输速度正比于码所表示的符号数目的对数。这表明据此已经能够测度讯息量。根据这一应用背景，他开始进一步研究电报电话中被传输的讯息到底是什么，并意识到传输的是“信息(information)”。由此可见，奈奎斯特是信息论发展的先驱者之一。

最早对信息进行科学定义的是哈特莱(R. V. L. Hartley)，他毕业于牛津大学，长期在贝尔(Bell)实验室进行研究工作，是一个在电子领域作出杰出贡献的美国科学家。1928年，他和奈奎斯特一样，也是在《贝尔系统技术》杂志上，发表了历史性的论文《信息的传输》(*Transmission of information*)。在论文中，他明确指出：希望在通信系统中实现信息的测度，这样就能够对在不同系统中传输的信息进行比较。哈特莱在心理和物理方面，就所谓的“含义(meaning)”与“信息(information)”两者作了区分，将后者即信息定义为所有可能的消息数量，与消息包含的意义无关。他同时认为：信息是一个非常有弹性的术语，信息存在于传输的符号中，符号对于通信的各方，有明确的意义。当某些人接收到信息时，所接收到的符号应允许省略的可能性，并包括另外可能的符号及其相应的意义。信息的精确度取决于这些另外符号的选择。可以通过信息传输中的对数定律来定义信息。例如：从  $D$  个彼此不同的符号中取出  $N$  个符号并且组成一个“字(词)”的问题。如果各个符号出现的概率相同，并且选取是随机的，就可以得到  $DN$  个不同的字。从这些字里取了特定的一个，就对应着带来了一个信息量  $I$ 。哈特莱建议用数量  $N \log D$  表示这个信息量，即  $I = N \log D$ 。这里实际他已经吸收了奈奎斯特的研究成果。这样的定义在一定程度上能够解释通信中的一些信息问题，但他在论文中并没有对信息的核心概念给出恰当的定义，所定义的信息，不涉及信息的价值和具体内容，只考虑符号的选择方式，也没有考虑各种可能选择方式的统计特性，直接限制了其应用的广泛性。

1947年10月，控制论创始人之一，美国科学家维纳(N. Wiener)的划时代著作《控制论》(*Cybernetics*)在墨西哥国立心脏研究所完稿，1948年由纽约的威利(Wiley)书店出版发行。维纳借用希腊词“舵手”，利用它在英语中的发声，找到了 cybernetics 一词。维纳认为：这个词是能够表达所适用的一切领域控制技术和科学这一概念的最好词汇。维纳的控制论不是直接研究现实世界中的受控对象，而是研究受控对象的数学模型——控制系统。《控制论》一书的全称是《控制论或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》(*Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*)。书中指出：“信息是信息，不是物质，也不是能量”，明确提出信息是与物质、能量同等重要又互相并行的基本概念。是维纳首先将“信息”提



升到“最基本概念”的高度。

据此可以认为：信息对于物质而言具有相对独立性，信息不遵循质量守恒定律，其性质和内容与物质载体的变换无关；另外，信息在传递和转换过程中也不服从能量守恒定律，信息可以共享，而能量不能共享，信息效用的大小并不由其消耗来决定。同时，信息与物质、能量又存在着密切的相互依存关系：物质、能量和信息这三者中，能量和信息皆源于物质，任何信息的产生、表述、存储和传递都要以物质为基础，也离不开能量；从另一方面来说，物质运动的状态和方式需要借助信息来表现和描述，能量的转换与驾驭也同样离不开信息。

后来，维纳在《人有人的用处》一书中，又提出：“信息是人们在适应外部世界并且使这种适应反作用于外部世界的过程中，同外部世界进行互相交换的内容的名称”。由于人们在与外部世界相互作用的过程中，还进行着物质与能量的交换，因此这样的定义在某种程度上又把信息与物质、能量的概念混同了起来。

1948年，信息论的奠基人，美国数学家香农(C. E. Shannon)在《贝尔系统技术》杂志上发表了一篇题为《通信的数学原理》(*The Mathematical Theory of Communication*)的论文。论文以概率论为基础，深刻阐述了通信工程的一系列基本理论问题，给出了计算信源信息量和信道容量的方法和一般公式，提出了著名的编码三大定理：香农第一定理是可变长无失真信源编码定理；香农第二定理是有噪信道编码定理；香农第三定理是保真度准则下的有失真信源编码定理。它们为现代通信技术的发展奠定了理论基础。

香农发现，通信系统所处理的信息在本质上都是随机的，可以用统计方法进行处理。香农在进行信息定量计算的时候，明确地把信息量定义为随机不确定性程度的减少。认为不确定性的消除，就获得了信息，原先的不确定性消除得越多，获得的信息就越多；如果不确定性全部消除了，就获得了全部信息；若消除一部分，可获得一部分信息；若没有任何消除，则没有获得任何信息。香农认为：信息是用来减少随机不确定性的东西，信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。

虽然香农的信息概念比以往的认识有了很大的进步，但仍存在局限性，这一定义同样没有包含信息的内容和价值。香农认为：信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。这个定义的出发点是假定事物状态都可以用一个概率模型来描述，但这样的模型不一定任何情况下都存在。另外，香农对信息的定义与上述定义一样，完全排除了信息的主观含义。实际上，信息有很强的主观性和适用性，例如，两个音乐修养不同的人听同一首乐曲，获得的信息量就会有很大的不同。因此，信息具有两个特征：广泛性和抽象性。

上述经典定义虽都有某种局限，但有一个基本点是共同的，即信息就是信息，不是物质，不是能量，需要研究、探索和建立针对信息的科学理论。

“信息”到底是什么？现代许多学者仍在不懈地探索中。有人提出：用变异度、差异量来测度信息，认为“信息就是差异”。这种观点的典型代表是意大利学者朗格(G. Longe)。他在1975年出版的《信息论：新的趋势与未决问题》一书的序言中提出：信息是反映事物的形式、



关系和差别的东西。信息包含在客体间的差别中而不是在客体本身中。对通信来说,仅仅差别关系是重要的。他将信息定义为客体之间的相互差异,应当说,宇宙内到处存在差异;差异的存在,表示存在“不确定性”,导致人们产生“疑问”,这确实表明了差异就是信息,但不能说没有差异就没有信息。“年年岁岁花相似,岁岁年年人不同”,“花相似”和“人不同”都从一个侧面反映了物是人非、人世沧桑的社会信息。年年看起来似乎是一样美好的“花”蕴含着与“人不同”的感叹同样丰富的信息,因此,将差异作为信息的定义也不完全贴切。

我国学者钟义胜教授在1996年出版的《信息科学原理》一书中认为:信息就是事物运动的状态和方式,就是关于事物运动的千差万别的状态和方法的知识;信息是物质的属性。这一定义所包含的观点,确已超出通信的范畴。宇宙万物,无时不在运动中,只要有运动的事物,就需要有能量,就会产生各种各样事物运动的状态和方式,就会产生信息。信息是普遍存在的,它是物质的属性,但不是物质本身。事物运动的状态和方式一旦体现出来,就可以脱离原来的事物而相对独立地载负于别的事物上,而被提取、变换、传递、存储、加工和处理(后文将会看到,信息载负于信号上,信号是信息的载体),这充分体现出信息与信号及其分析和处理之间的基本关系。

### (1) 消 息

消息是一个与信息不同但又密切相关的概念。清华大学已故教授常迥在《信息理论基础》一书中明确指出:信息与消息是两个截然不同的概念,不可混淆。消息是由符号、文字、数字或语音组成的序列。一份电报、一句话、一段文字和报纸上登载的新闻都是消息。消息中不确定的内容构成信息。消息是信息的载体,信息是消息的内涵。消息是:运动或状态变化的直接反映和待处理与传输的原始对象,如语音、图像数据中所包含的内容。而信息具有消息不具备的特性,能消除某些知识的不确定性,使受信者知识状态改变,从不肯定到肯定,从无知到有知,如天气预报、上课等,都能使受信者获取信息。又如,北京2008年奥林匹克夏季运动会,有关中国代表团获得金牌数的信息,在2008年8月8日前甚至在8月24日运动会结束前,充满了不确定性,包含有丰富的信息,可以说“什么事情都可能发生”;但一旦运动会闭幕之后,51块的金牌数目和获奖运动员都已产生,有关金牌数目的消息就一点信息都没有了,因为事情已经成为毫无悬念的确凿事实,因此同样的消息(运动会前后分布的各种相关消息)包含的信息可能很不一样,因此信息与消息既有区别,又有联系。

### (2) 信 号

常迥教授又明确指出:按照信息论或控制论的观点,在通信和控制系统中传送的本质内容是信息,系统中实际传输的则是测量的信号,信息包含在信号之中,信号是信息的载体。信号到了接收端(信息论里称为信宿)经过处理变成文字、语声或图像,文字、语声或图像包含的内容是消息,人们再从中得到信息,这就明确了信息、消息与信号间的区别和联系。

上面引述了在信息论里几个经典的有代表性的信息定义以及消息、信号的基本概念,目的是使读者对相关概念及其相互关系有基本了解,把着眼点放在信息及相关概念的基本内涵上,



从而为进一步建立信息与信号之间的重要联系奠定基础,因此并不拘泥于哪一种信息定义是最标准的。根据上述定义中的共同点,结合我们学科的特点,不妨把信息理解为:信息是反映一个系统的状态或特性的预先未知的报道(描述)。预先未知是强调有关系统状态或特性消息的“新”或者不确定性,突出一个“新”字,强调消息中的不确定性或未知性。简而言之,信息是从外界事物中获取到的、新的、不可预知、不确定或尚未获得的认知(感知)。

信号是信息的表现形式,消息是信号的具体内容,集中反映了信息、消息和信号三者之间的关系。信号携带着消息,它是消息的运载工具,从而也携带、运载着信息。信号携带着信息,但不是信息本身;同一信息可以用不同的信号表示,同一信号也可以表示不同的信息。人们需要正确地获取、有效地传递并可靠地交换科技、教育、文化、社会、经济等各种信息,但信息本身不具备传输和交换的能力,必须载负于信号这一载体并通过对信号的分析处理来实现信息的获取或交换。本书的后续内容将集中于信号分析处理的原理、方法和技术上。

信号可表示为某种物理量,如声、光、温度、压力、速度、流量、心电图、脑电图、电压、电流等随时间(或空间)变化的函数  $f(t)$ 。广义讲,一切运动或状态的变化理论上都可用数学抽象的方式描述,如  $f(t)$ 。 $f(t)$ 中的自变量  $t$  通常指时间,但不限于时间。也就是说,信号是指一个实际的物理量(最常见的是电量),数学上可以表示为一个数学函数(或其他数学形式),例如:

$$f(t) = A\cos(\Omega_1 t + \varphi) \quad (1.1)$$

它既是正弦信号(余弦信号也可统称为正弦信号),也是正弦函数。在信号理论中,信号和函数是通用的。

信号是一种转载信息的函数,人们要获取信息,首先要获取信号,再通过适当的信号分析与处理,才能取得需要的信息。

例如:在飞行过程中,飞行员想要知道“飞行是否正常”的信息,必须先获得有关飞机飞行状态的参数,如高度  $H$ 、速度  $v$ 、航向  $\psi$  等随时间变化的函数关系,以及表征发动机工作状态的参数,如温度  $T$ 、压力  $p$ 、转速  $n$ 、流量  $\Phi$  等随时间变化的情况。在飞机上,上述物理参数的情况(包含了飞行是否正常的信息)通过相应的传感器,变换为电压或电流随时间变化的信号,信号携带着消息,同时携带着飞行是否正常的信息。当驾驶员和机务人员(或者自动驾驶系统)得到相应的信号后,依据相应的专业知识对这些信号进行分析和处理,得出飞行正常与否的信息,并作出相应的响应和处理。

上面的例子清楚地说明了信号与信息两者之间的密切关系,概括起来,可以认为:

- ① 信号是物理量或函数;
- ② 信号中包含着信息,是信息的载体;
- ③ 信号不是信息,必须对信号(包含的消息)进行分析和处理后,才能从信号中提取出信息,这是学习和应用信号分析与处理的根本目的。