

倪维桢 王钦笙 等编著

数字  
电话  
通信  
原理

SHUZI  
DIANHUA  
TONGXIN  
YUANLI

人民邮电出版社

# 数字电话通信原理

倪维桢 王钦笙 等编著

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书介绍数字电话基础知识。全书共分十三章，第一、二两章介绍语音基本特性和模拟电话通信基本概念。从第三章起讨论数字电话通信，内容包括语音编码（脉码调制和增量调制）、再生中继、同步定时、出入中继、传输质量、测量技术以及数字通信网的同步等。

本书适合于有关专业院校师生作教学或教学参考，也可供有关工程技术人员阅读参考。

## 数 字 电 话 通 信 原 理

倪维桢 王钦笙等 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

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 1982年6月 第一版  
印张：19 页数：304 1982年6月河北第一次印刷  
字数：434千字 印数：1—4,400册

统一书号：15045·总2569-有5242

定价：2.05元

# 前 言

由于数字通信技术的发展，我们于1972年编写了《数字电话终端基础》教材，经过教学实践，作了几次修改和补充，于1979年开始进一步改写、整理成《数字电话通信原理》一书，以适应我国数字通信事业的发展和教学工作的需要。

本书从电话通信的语声特性和模拟电话通信基本概念讲起，接着讨论数字电话通信，包括语声编码（脉码调制和增量调制）、再生中继、同步定时、出入中继、传输质量以及测量技术等等。通过对PCM30/32路系统的分析讨论，介绍数字通信系统及其主要部件的工作原理和分析方法。最后介绍数字通信网的同步。在编写中力求通俗易懂、把理论与实践、定性分析和定量分析相结合，以便读者易于掌握。

本书第一、二、六、十章由倪维桢编写；第三、五、十一、十二章由王钦笙编写。第四、十三章；第七章；第八、九章分别由刘罗松、周继成、林道龙编写、全书由倪维桢、王钦笙统一审阅。参加编写本书的前身《数字电话终端基础》讲义的还有周炯槃、沈树雍、张方葛、杨基珊等教师。由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

一九八〇年十月

# 目 录

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| <b>第一章 语声基本特性</b> .....   | ( 1 )  |
| 第一节 语声的频谱 .....           | ( 1 )  |
| 第二节 语声的特性 .....           | ( 3 )  |
| 第三节 语声的清晰度、可懂度和自然度 .....  | ( 4 )  |
| 第四节 影响接收语声质量的因素 .....     | ( 5 )  |
| 一、语声质量和频带宽度 .....         | ( 5 )  |
| 二、收话音量 .....              | ( 6 )  |
| 三、信噪比 .....               | ( 6 )  |
| 四、幅度—频率失真 .....           | ( 7 )  |
| 五、非线性失真 .....             | ( 7 )  |
| 第五节 小结 .....              | ( 8 )  |
| <b>第二章 模拟电话通信简介</b> ..... | ( 9 )  |
| 第一节 模拟电话通信的实现 .....       | ( 9 )  |
| 一、声和电的互相转换 .....          | ( 9 )  |
| 二、通话电路 .....              | ( 14 ) |
| 三、差动系统 .....              | ( 19 ) |
| 第二节 模拟电话通信的多路复用 .....     | ( 24 ) |
| 一、频率搬移 .....              | ( 24 ) |
| 二、单路载波电话 .....            | ( 27 ) |
| 三、三路载波电话 .....            | ( 27 ) |
| 四、其他载波电话 .....            | ( 29 ) |
| 第三节 模拟电话通信的主要特点 .....     | ( 30 ) |
| 第四节 小结 .....              | ( 32 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| <b>第三章 数字电话通信概念</b> .....      | ( 33 )  |
| <b>第一节 数字电话通信的实现</b> .....     | ( 33 )  |
| 一、脉码调制通信 .....                 | ( 34 )  |
| 二、增量编码调制通信 .....               | ( 43 )  |
| <b>第二节 数字电话通信的时分多路复用</b> ..... | ( 48 )  |
| 一、基本概念 .....                   | ( 48 )  |
| 二、时分多路方框图 .....                | ( 50 )  |
| 三、时分多路系统的数码率 .....             | ( 51 )  |
| <b>第三节 数字通信的主要特点和用途</b> .....  | ( 56 )  |
| <b>第四节 小结</b> .....            | ( 60 )  |
| <b>第四章 抽样</b> .....            | ( 61 )  |
| <b>第一节 模拟信号的抽样</b> .....       | ( 61 )  |
| 一、抽样定理 .....                   | ( 61 )  |
| 二、信号抽样后的频谱 .....               | ( 69 )  |
| 三、带通型信号的抽样 .....               | ( 80 )  |
| <b>第二节 抽样门</b> .....           | ( 82 )  |
| 一、二极管桥型双向抽样门 .....             | ( 82 )  |
| 二、三极管抽样门 .....                 | ( 88 )  |
| 三、场效应三极管抽样门 .....              | ( 92 )  |
| <b>第三节 电压抽样保持</b> .....        | ( 97 )  |
| 一、工作原理 .....                   | ( 98 )  |
| 二、误差分析 .....                   | ( 101 ) |
| 三、电路举例 .....                   | ( 103 ) |
| <b>第四节 电流抽样保持</b> .....        | ( 105 ) |
| 一、设想 .....                     | ( 105 ) |
| 二、实现 .....                     | ( 106 ) |
| 三、电压、电流结合式高速抽样保持电路 .....       | ( 108 ) |
| <b>第五节 分路抽样保持</b> .....        | ( 111 ) |

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| 第六节 小结 .....               | ( 116 )        |
| <b>第五章 编码与解码 .....</b>     | <b>( 118 )</b> |
| 第一节 量化与压缩扩张 .....          | ( 118 )        |
| 一、量化和量化噪声 .....            | ( 118 )        |
| 二、压缩与扩张 .....              | ( 122 )        |
| 第二节 编码码组与编码码型 .....        | ( 140 )        |
| 一、码组的位数 .....              | ( 140 )        |
| 二、码位的安排 .....              | ( 140 )        |
| 三、编码码型 .....               | ( 141 )        |
| 第三节 编码 .....               | ( 147 )        |
| 一、逐次反馈型编码 .....            | ( 147 )        |
| 二、级联型编码 .....              | ( 172 )        |
| 三、级联-逐次反馈混合型编码 .....       | ( 180 )        |
| 第四节 解码 .....               | ( 183 )        |
| 一、加权网络型解码 .....            | ( 183 )        |
| 二、级联型解码 .....              | ( 200 )        |
| 三、折叠级联加权网络混合型解码 .....      | ( 204 )        |
| 第五节 小结 .....               | ( 205 )        |
| <b>第六章 脉码通信的质量分析 .....</b> | <b>( 206 )</b> |
| 第一节 串音 .....               | ( 207 )        |
| 一、传输模型 .....               | ( 208 )        |
| 二、上截止频率和串音的关系 .....        | ( 209 )        |
| 三、下截止频率和串音的关系 .....        | ( 211 )        |
| 第二节 折叠噪声 .....             | ( 214 )        |
| 第三节 量化噪声 .....             | ( 216 )        |
| 一、量化噪声的分析 .....            | ( 217 )        |
| 二、量化噪声功率 .....             | ( 218 )        |
| 第四节 均匀量化的信噪比 .....         | ( 221 )        |

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 一、未过载时均匀量化的信噪比·····          | ( 221 ) |
| 二、过载时的量化信噪比·····             | ( 224 ) |
| 三、均匀量化时语声信号总的信噪比·····        | ( 225 ) |
| 第五节 非均匀量化的信噪比·····           | ( 226 ) |
| 一、一般算式·····                  | ( 226 ) |
| 二、按 $\mu$ 律压扩时的信噪比·····      | ( 228 ) |
| 三、按 $A$ 律压扩时的信噪比·····        | ( 236 ) |
| 四、按折线近似时编译码的量化信噪比·····       | ( 247 ) |
| 第六节 群路编码的量化信噪比·····          | ( 254 ) |
| 第七节 信道误码对脉码通信的影响·····        | ( 256 ) |
| 一、信道误码对自然二进码的影响·····         | ( 257 ) |
| 二、信道误码对 $A$ 律13折线编码的影响·····  | ( 258 ) |
| 第八节 脉冲相位抖动对PCM传输的影响·····     | ( 265 ) |
| 第九节 小结·····                  | ( 269 ) |
| 第七章 增量调制·····                | ( 272 ) |
| 第一节 简单增量调制的特性·····           | ( 272 ) |
| 一、过载特性·····                  | ( 272 ) |
| 二、量化噪声·····                  | ( 275 ) |
| 三、编码的动态范围·····               | ( 280 ) |
| 四、增量调制器的动态范围·····            | ( 282 ) |
| 五、信道误码对增量调制系统的影响·····        | ( 283 ) |
| 第二节 PCM和 $\Delta M$ 的比较····· | ( 290 ) |
| 一、语音质量·····                  | ( 290 ) |
| 二、频率响应·····                  | ( 292 ) |
| 三、设备复杂性·····                 | ( 294 ) |
| 四、误码率的影响·····                | ( 294 ) |
| 第三节 双积分增量调制·····             | ( 295 ) |
| 一、双积分增量调制的分析·····            | ( 296 ) |

|                                                                    |         |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
| 二、改进的双积分增量调制 .....                                                 | ( 298 ) |
| 第四节 高信息增量调制 .....                                                  | ( 305 ) |
| 一、基本原理 .....                                                       | ( 306 ) |
| 二、解法器 .....                                                        | ( 307 ) |
| 三、基本性能 .....                                                       | ( 308 ) |
| 第五节 连续增量调制 .....                                                   | ( 310 ) |
| 一、基本原理 .....                                                       | ( 310 ) |
| 二、基本性能 .....                                                       | ( 313 ) |
| 第六节 数字压扩增量调制( $\Delta M$ )与总和增量调制<br>( $\Delta - \Sigma M$ ) ..... | ( 317 ) |
| 一、数字压扩 $\Delta M$ 的基本原理 .....                                      | ( 318 ) |
| 二、 $\Delta - \Sigma M$ 的基本原理 .....                                 | ( 322 ) |
| 三、数字检测音节压扩 $\Delta - \Sigma M$ 原理 .....                            | ( 329 ) |
| 第七节 差值脉码调制(DPCM) .....                                             | ( 331 ) |
| 一、基本原理 .....                                                       | ( 331 ) |
| 二、基本特性 .....                                                       | ( 334 ) |
| 第八节 小结 .....                                                       | ( 337 ) |
| 第八章 定时与帧同步 .....                                                   | ( 339 ) |
| 第一节 定时系统 .....                                                     | ( 339 ) |
| 一、发定时系统 .....                                                      | ( 340 ) |
| 二、收定时系统 .....                                                      | ( 354 ) |
| 第二节 帧同步系统 .....                                                    | ( 355 ) |
| 一、对帧同步系统的要求 .....                                                  | ( 356 ) |
| 二、实现帧同步的方法 .....                                                   | ( 358 ) |
| 三、复帧同步 .....                                                       | ( 379 ) |
| 第三节 小结 .....                                                       | ( 384 ) |
| 第九章 标志信号系统和出、入中继器 .....                                            | ( 386 ) |
| 第一节 标志信号系统 .....                                                   | ( 387 ) |

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 一、标志信号发送系统 .....             | ( 388 ) |
| 二、标志信号接收系统 .....             | ( 396 ) |
| 第二节 出、入中继器 .....             | ( 401 ) |
| 一、出中继器 .....                 | ( 402 ) |
| 二、入中继器 .....                 | ( 406 ) |
| 第三节 小结 .....                 | ( 409 ) |
| 第十章 再生中继 .....               | ( 410 ) |
| 第一节 概述 .....                 | ( 410 ) |
| 一、再生中继传输 .....               | ( 410 ) |
| 二、信道误码率计算 .....              | ( 412 ) |
| 三、再生中继和非再生中继对传输数字信号的影响 ..... | ( 418 ) |
| 第二节 传输线路 .....               | ( 419 ) |
| 一、市话电缆 .....                 | ( 419 ) |
| 二、电缆的串音 .....                | ( 421 ) |
| 三、长途星绞电缆 .....               | ( 427 ) |
| 四、明线线路 .....                 | ( 429 ) |
| 五、同轴电缆 .....                 | ( 430 ) |
| 六、微波无线传输 .....               | ( 432 ) |
| 七、波导传输 .....                 | ( 434 ) |
| 八、光缆传输 .....                 | ( 435 ) |
| 第三节 线路传输脉型和码型 .....          | ( 436 ) |
| 一、传输码型的选择 .....              | ( 436 ) |
| 二、双极性半占空脉型的产生 .....          | ( 439 ) |
| 三、常用的几种传输码型 .....            | ( 441 ) |
| 第四节 接收波形的均衡和放大 .....         | ( 449 ) |
| 一、对均衡波的要求 .....              | ( 450 ) |
| 二、升余弦波均衡特性 .....             | ( 451 ) |
| 三、有理函数型均衡 .....              | ( 455 ) |

|                                          |         |
|------------------------------------------|---------|
| 四、信码的判决和再生 .....                         | ( 472 ) |
| 五、保持最佳判决的一些措施 .....                      | ( 477 ) |
| 第五节 定时提取 .....                           | ( 487 ) |
| 一、定时提取的各种方法 .....                        | ( 487 ) |
| 二、定时提取电路举例 .....                         | ( 489 ) |
| 三、影响定时相位的各种因素 .....                      | ( 492 ) |
| 四、定时相位偏移(或抖动)的影响 .....                   | ( 497 ) |
| 第六节 远距供电系统 .....                         | ( 499 ) |
| 一、利用“幻线”传送电能 .....                       | ( 499 ) |
| 二、多个中继站的远供 .....                         | ( 500 ) |
| 三、中继站内供电电路 .....                         | ( 501 ) |
| 第七节 中继段长度计算 .....                        | ( 503 ) |
| 一、指标分配 .....                             | ( 503 ) |
| 二、等效传输频率 .....                           | ( 504 ) |
| 三、等效串音频率 .....                           | ( 506 ) |
| 四、中继段长度计算举例 .....                        | ( 508 ) |
| 第八节 小结 .....                             | ( 509 ) |
| 第十一章 PCM的高次群 .....                       | ( 512 ) |
| 第一节 PCM二次群复接(分接)原理 .....                 | ( 515 ) |
| 一、PCM二次群系统 .....                         | ( 515 ) |
| 二、复接设备 .....                             | ( 516 ) |
| 三、异步复接 .....                             | ( 519 ) |
| 四、同步复接 .....                             | ( 524 ) |
| 五、PCM三次群和四次群的帧结构 .....                   | ( 525 ) |
| 第二节 PCM FDM变换 .....                      | ( 527 ) |
| 一、PCM $\leftrightarrow$ FDM变换的基本思路 ..... | ( 529 ) |
| 二、韦弗—达林顿方法的基本原理 .....                    | ( 530 ) |
| 三、快速付氏变换与多相网络实现PCM FDM的变换 .....          | ( 531 ) |

|             |                         |                |
|-------------|-------------------------|----------------|
| 第三节         | 小结 .....                | ( 540 )        |
| <b>第十二章</b> | <b>测量 .....</b>         | <b>( 541 )</b> |
| 第一节         | PCM终端设备的测量 .....        | ( 541 )        |
| 一、          | 量化噪声 .....              | ( 541 )        |
| 二、          | 净衰减电平特性 .....           | ( 547 )        |
| 三、          | 净衰减频率特性 .....           | ( 549 )        |
| 四、          | 谐波失真 .....              | ( 550 )        |
| 五、          | 路际可懂串话衰减 .....          | ( 551 )        |
| 六、          | 不通话噪声 .....             | ( 552 )        |
| 七、          | 脉冲泄漏噪声 .....            | ( 552 )        |
| 第二节         | PCM中继传输系统的测量 .....      | ( 553 )        |
| 一、          | 误码率的测量 .....            | ( 553 )        |
| 二、          | 中继系统故障位置的测定 .....       | ( 562 )        |
| 附:          | 符号说明 .....              | ( 566 )        |
| 第三节         | 小结 .....                | ( 567 )        |
| <b>第十三章</b> | <b>数字通信网的网同步 .....</b>  | <b>( 568 )</b> |
| 第一节         | 数字通信网的构成及网同步问题的提出 ..... | ( 568 )        |
| 第二节         | 全网同步系统 .....            | ( 571 )        |
| 一、          | 主从系统 .....              | ( 572 )        |
| 二、          | 互同步系统 .....             | ( 574 )        |
| 三、          | 等级式主从同步系统 .....         | ( 582 )        |
| 第三节         | 准同步系统 .....             | ( 583 )        |
| 第四节         | 非同步系统 .....             | ( 591 )        |
| 第五节         | 小结 .....                | ( 594 )        |

# 第一章 语声基本特性

语声即人的语言声音，语声通信即指电话通信，它是各种通信如广播、电视、电报、数据通信中最基本的一种。

数字通信就是把电话、广播、电视、电报及数据等等信号变成一系列的数字信号进行传输。数字通信应用范围很广，但目前主要用于语声通信方面。本书在具体讨论语声数字化之前，简要介绍语声通信概况和语声基本特性是很必要的。

本章将主要介绍语声的特性、语声信号的频谱、动态范围及有关语声质量等内容。

## 第一节 语声的频谱

人的语声是由元音和辅音组成的。发元音时，气流从气管里呼出，使声带发生振动，而后经口腔流出，不受任何部位的阻碍，产生具有周期性的声波，形成较柔和的乐音，如  $a$ 、 $e$ 、 $i$ 、 $o$ 、 $u$ 。发辅音时，气流在声道里要经过不同部位的阻碍。辅音的声波是不规则的非周期性的波，形成一种噪声。发辅音时，声带振动的称浊音，声带不振动的称为清音。

由于发音情况不同，语声信号的频谱也不相同。如果我们较长时间的发一个元音，分析它的频谱可知，元音的频谱是由基音频率和高次谐频所组成。其中基音振幅最大，图1-1 为 一

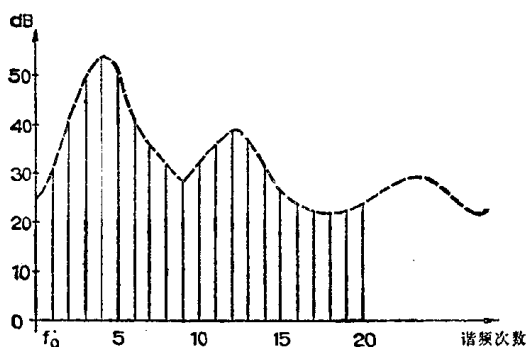


图 1-1

个元音的频谱。

从图中可看出，频谱的包络形成了一些峰值，这些峰值称为共振峰。实验表明，第一、二、三个共振峰对辨别语声很重要，不同的元音有不同位置的

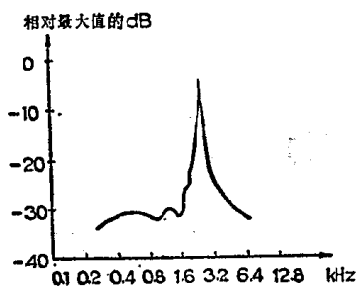


图 1-2

共振峰。然而，对辨别不同人的语声基音频率起决定作用。图中  $f_0$  为基音频率。男声的基频最低者一般为100 赫，女声基频高者可达300赫以上。一般  $f_0$  在80~400赫之间。

辅音与噪音相似，波形较复杂，是没有规则的。图1-2 为 S 音的频谱。

## 第二节 语 声 的 特 性

### 一、语声的能量

我们已经知道，声音是由弹性物体振动产生，声波具有能量。声能与声音的频率有着密切的关系。

实验得知，语声低频部分包含的能量较多，高频部分包含的能量较少。如果除去500赫以下的频率，对一般语声来说能量要减少60%，如果除去1500赫以上的频率，语声的平均能量只减少12%，但清晰度要相应减少。

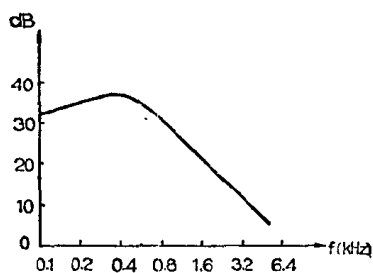


图 1-3

图1-3表示语声的平均功率频谱。由图可见，能量集中在400-900赫之间，从大约700赫开始，随着频率的增高所包含的能量很快下降，频率每增加一倍，能量约下降8~10分贝。

### 二、语声的动态范围

我们已经知道声波是物体振动时，激励它周围的空气质点振动而产生的。由于声音是由元音、辅音共同组成的，因此，声波的波形也是复杂的。图1-4是声波在一短时间内的波形，其**瞬时幅度**是变化的。

在电话通信中，电信号是由语声信号转换来的，要使语声信号不失真，电信号应有一个最大电压和最小电压幅度，这个

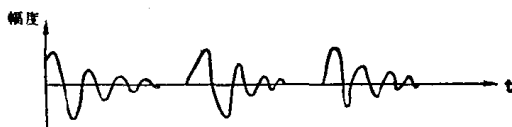


图 1-4

最大电压和最小电压之比称为信号源的动态范围。由于发话人的不同,语声变成电信号后,动态范围可达60~70分贝。实际上,要使信号源作到这样宽的动态范围是很困难的。一般最多为40分贝。

### 第三节 语声的清晰度、可懂度和自然度

在电话通信中并不要求通信设备必须达到把发话人的声音原原本本的再现出来,而是要求能听懂、听清所发出的语言。通话质量的好坏最终是由收话人的听觉来判断的,所以度量电话电路的质量时首先要提到清晰度。

所谓**清晰度**就是发出声音后,在听的地方可以听懂的正确程度的百分数。评定的方法是对于采用拼音文字的语言,一个人在发端发出一些单音词,而由几个人收听并记下来,收听的正确单词所占的百分比为**单词清晰度**。若发端发出的是整个句子,则正确理解原句的所占百分比称**句子可懂度**。除此以外,还有**自然度**指标。自然度是指语声经过信号变换,传输后所复原的声音听起来和原来发出的语声在音色上的相似程度。或用收听者判断发话人是谁来衡量。一般自然度不用数字表示,而用好,较好,较差,很差等说明。

## 第四节 影响接收语声质量的因素

影响接收语声质量的因素较多，就语声方面主要有下列几点：

### 一、语声质量和频带宽度

可闻声音约为16~20000赫，但如果要求每个电话通路占用这么宽的频带就太不经济了，而且也是不必要的。因为语声质量在很大程度上是用清晰度来衡量的，因此最好研究一下频带宽度和清晰度的关系。

通过大量实验证明，如果没有其他因素对语声的影响，那么把语声频带限制在200~6000赫范围内几乎完全不影响收话的自然度，而清晰度和可懂度可达100%。为了分析200~6000赫范围内各频段对语声质量的影响，把它分成二十个频段，使每个频段对语声具有相同的质量影响。因此如果通信系统能通过所有这二十个频段的语声信号，则语声质量不受丝毫影响，如果通信系统只能传输其中的一部分频段，则收话质量有所下降。表1.1为二十个频段的划分。这里每个频段对语声质量(清晰度和可懂度)的影响是一样的。从表中可知，频段越高影响越小，例如第18段的600赫带宽和第5段的140赫带宽对语声有着相同的质量效应，这是因为语声的主要能量集中在较低的频段。为了研究这些频段对语声质量的影响，

做了大量统计实验，得出图1-5的曲线，其中清晰度指数 $C$ 由

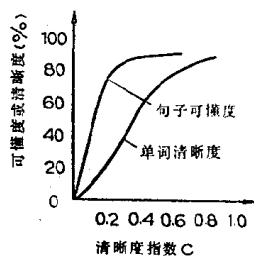


图 1-5

做了大量统计实验，得出图1-5的曲线，其中清晰度指数 $C$ 由