

通信工程丛书

# 数 据 传 输

(修订本)

郭梯云 刘增基 王新梅 等编著  
詹道庸 杨 洽

中国通信学会主编·人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书是《通信工程丛书》之一,是原《数据传输》的修订本。

全书力求兼顾理论的完整性、先进性和工程实用性,所要解决的基本问题是数据与信道的匹配问题。全书从传输信道入手,围绕信道的特征分述数据传输的三大技术关键,即调制与解调、同步和差错控制。最后举出几个典型的数据传输系统的例子,以增强整体概念,使读者了解数据传输系统的设备及各项技术措施是如何以信道的客观规律为转移的。

在修订过程中主要增加了新的调制技术、差错控制技术、分组无线数据网和综合业务数字网等方面的内容。

全书共十章(详见目录)。书后附有附录 A、B、C 和英汉名词对照表。

本书可供大专院校通信专业的毕业生与其他具有一定通信知识的工科毕业生以及从事通信工作的工程技术人员阅读,也可作为通信专业在校大学生的参考书。

通信工程丛书

### 数据传输(修订本)

◆ 编 著 郭梯云 刘增基

王新梅 詹道庸 杨 洽 等

责任编辑 梁 凝

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

北京鸿佳印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:850×1168 1/32

印张:23.625

字数:624 千字

1998 年 10 月第 2 版

印数:14 501—18 500 册

1998 年 10 月北京第 5 次印刷

ISBN 7-115-06887-9/TN · 1311

定价:43.00 元

## 丛书前言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握有关专业的基础理论知识,提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力,了解通信技术的新知识和发展趋势,以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献,我会与人民邮电出版社协作,组织编写这套“通信工程丛书”,陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发,密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要,阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识,包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求,以及技术更新等方面,力求做到资料比较丰富完备,深浅适宜,条理清楚,对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材,不仅介绍有关的物理概念和基本原理,而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际;论证简明扼要,避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们,我们表示衷心感谢,殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议,使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 概论               | 1  |
| 1.1 数据传输系统的组成及其主要指标  | 2  |
| 1.2 数据传输系统的主要技术问题    | 7  |
| 第二章 传输信道             | 13 |
| 2.1 信道的一般表述          | 14 |
| 2.1.1 恒参信道           | 15 |
| 2.1.2 变参信道           | 15 |
| 2.1.3 噪声或干扰          | 21 |
| 2.2 信道复用技术           | 27 |
| 2.2.1 频分复用           | 28 |
| 2.2.2 同步时分复用         | 28 |
| 2.2.3 异步时分复用         | 29 |
| 2.3 有线电信道            | 31 |
| 2.3.1 传输媒质的基本特性      | 31 |
| 2.3.2 现有的公共电话网       | 38 |
| 2.3.3 模拟话路信道对数据传输的限制 | 43 |
| 2.4 光纤信道             | 52 |
| 2.4.1 光纤信道的一般组成      | 53 |
| 2.4.2 光纤的传输特性        | 54 |
| 2.4.3 光源             | 58 |
| 2.4.4 光探测器           | 59 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 2.4.5 中继距离 .....        | 62         |
| 2.5 无线电接力信道 .....       | 65         |
| 2.5.1 无线电接力信道的构成 .....  | 65         |
| 2.5.2 电波传播特点 .....      | 69         |
| 2.5.3 信道设备参数的估算 .....   | 79         |
| 2.5.4 移动无线电信道的特征 .....  | 85         |
| 2.6 卫星中继信道 .....        | 89         |
| 2.6.1 卫星中继信道的组成 .....   | 90         |
| 2.6.2 工作频段与电波传播特点 ..... | 97         |
| 2.6.3 卫星信道计算 .....      | 99         |
| 2.7 对流层散射信道 .....       | 109        |
| 2.7.1 衰落 .....          | 110        |
| 2.7.2 传播损耗 .....        | 112        |
| 2.7.3 信道的允许频带 .....     | 113        |
| 2.7.4 天线与媒质间的耦合损耗 ..... | 114        |
| 2.7.5 典型参数与应用场合 .....   | 115        |
| 2.8 短波电离层反射信道 .....     | 116        |
| 2.8.1 传播路径 .....        | 117        |
| 2.8.2 工作频率选择原则 .....    | 117        |
| 2.8.3 多径传播 .....        | 119        |
| 2.8.4 干扰 .....          | 121        |
| 2.8.5 应用 .....          | 121        |
| 参考文献 .....              | 122        |
| <b>第三章 基带传输</b> .....   | <b>123</b> |
| 3.1 概述 .....            | 123        |
| 3.2 基带信号的波形与码型 .....    | 126        |
| 3.2.1 随机脉冲序列的功率谱 .....  | 127        |
| 3.2.2 基带脉冲的波形 .....     | 132        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 3.2.3 常用码型 .....            | 137        |
| 3.3 基带传输系统 .....            | 148        |
| 3.3.1 最佳基带传输系统 .....        | 150        |
| 3.3.2 二进制与多进制系统 .....       | 156        |
| 3.3.3 设计步骤及举例 .....         | 158        |
| 3.4 眼图 .....                | 162        |
| 3.5 均衡 .....                | 164        |
| 3.5.1 均衡的一般概念 .....         | 165        |
| 3.5.2 线路均衡 .....            | 166        |
| 3.5.3 横向均衡器 .....           | 170        |
| 3.5.4 自动均衡器 .....           | 178        |
| 3.5.5 盲均衡 .....             | 184        |
| 参考文献 .....                  | 186        |
| <b>第四章 线性调制</b> .....       | <b>188</b> |
| 4.1 线性调制信号的一般表述 .....       | 189        |
| 4.2 振幅调制 .....              | 191        |
| 4.2.1 二进制振幅调制 .....         | 192        |
| 4.2.2 多进制振幅调制 .....         | 199        |
| 4.3 单边带(SSB)调制 .....        | 202        |
| 4.4 残留边带(VSB)调制 .....       | 208        |
| 4.5 正交振幅调制(QAM) .....       | 214        |
| 4.6 部分响应技术 .....            | 215        |
| 4.6.1 双二进制与变型双二进制部分响应 ..... | 216        |
| 4.6.2 部分响应的一般原理 .....       | 228        |
| 4.6.3 部分响应系统的性能 .....       | 233        |
| 4.6.4 正交部分响应(QPR) .....     | 235        |
| 参考文献 .....                  | 238        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第五章 数字频率调制</b> .....      | 239 |
| 5.1 频移键控信号 .....             | 240 |
| 5.1.1 频移键控信号的时域表示 .....      | 240 |
| 5.1.2 频移键控信号的相关系数 .....      | 243 |
| 5.1.3 随机频移键控信号的功率谱 .....     | 245 |
| 5.2 频移键控信号的产生 .....          | 250 |
| 5.3 频移键控信号的解调 .....          | 252 |
| 5.3.1 相干解调法 .....            | 253 |
| 5.3.2 最佳非相干解调法 .....         | 258 |
| 5.3.3 普通非相干解调法 .....         | 265 |
| 5.4 二进制频移键控传输系统的误码性能 .....   | 267 |
| 5.4.1 相干解调系统的误码性能 .....      | 267 |
| 5.4.2 分路滤波非相干解调系统的误码性能 ..... | 270 |
| 5.5 多进制频移键控 .....            | 271 |
| 参考文献 .....                   | 275 |
| <b>第六章 数字相位调制</b> .....      | 277 |
| 6.1 数字调相的一般原理 .....          | 277 |
| 6.1.1 数字调相的一般原理 .....        | 278 |
| 6.1.2 二相绝对移相信号的产生和解调 .....   | 283 |
| 6.1.3 二相绝对移相调制系统的性能 .....    | 285 |
| 6.2 二相相对移相调制 .....           | 285 |
| 6.2.1 二相相对移相信号的产生和解调 .....   | 286 |
| 6.2.2 二相相对移相调制系统的性能 .....    | 290 |
| 6.3 多相调制 .....               | 291 |
| 6.3.1 四相调制 .....             | 293 |
| 6.3.2 八相调制 .....             | 313 |
| 6.3.3 多相调制系统的性能 .....        | 329 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 参考文献                                  | 332        |
| <b>第七章 调制技术的发展及其性能</b>                | <b>333</b> |
| 7.1 数字调制的分类                           | 333        |
| 7.2 最小频移键控(MSK)                       | 339        |
| 7.3 高斯滤波最小频移键控(GMSK)                  | 358        |
| 7.4 $\pi/4$ 偏置—四相相移键控( $\pi/4$ -QPSK) | 376        |
| 7.5 软化调频(TFM)和广义软化调频(GTFM)            | 389        |
| 7.6 正交振幅调制(QAM)                       | 415        |
| 7.7 调制性能的比较                           | 434        |
| 参考文献                                  | 443        |
| <b>第八章 同步</b>                         | <b>445</b> |
| 8.1 概述                                | 445        |
| 8.2 锁相环的基本知识                          | 446        |
| 8.2.1 模拟式锁相环                          | 447        |
| 8.2.2 数字式锁相环                          | 459        |
| 8.3 载波同步                              | 466        |
| 8.3.1 非线性变换—滤波法                       | 467        |
| 8.3.2 同相—正交环                          | 471        |
| 8.3.3 反调制环                            | 473        |
| 8.4 位同步                               | 478        |
| 8.4.1 非线性变换—滤波法                       | 479        |
| 8.4.2 同相—中相位同步环                       | 483        |
| 8.4.3 早—迟积分位同步环                       | 487        |
| 8.4.4 几种位同步环路的比较                      | 492        |
| 8.5 群同步                               | 493        |
| 8.5.1 起止式同步                           | 494        |
| 8.5.2 用特殊字符建立群同步                      | 495        |



|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 8.5.3 群同步性能的估算 .....        | 496        |
| 8.5.4 标志字的设计 .....          | 503        |
| 8.6 扰乱与解扰 .....             | 505        |
| 参考文献 .....                  | 506        |
| <b>第九章 差错控制</b> .....       | <b>508</b> |
| 9.1 错误图样及信道模型 .....         | 509        |
| 9.1.1 差错类型和错误图样 .....       | 510        |
| 9.1.2 二进制对称信道(BSC) .....    | 511        |
| 9.1.3 修正二进制对称信道(GBSC) ..... | 512        |
| 9.2 差错控制的基本思想和分类 .....      | 513        |
| 9.2.1 差错控制方式的分类 .....       | 514        |
| 9.2.2 常用检错码 .....           | 518        |
| 9.3 线性分组码 .....             | 522        |
| 9.3.1 基本概念 .....            | 522        |
| 9.3.2 伴随式和检错 .....          | 526        |
| 9.3.3 汉明重量与汉明距离 .....       | 527        |
| 9.3.4 汉明码及其译码 .....         | 528        |
| 9.4 循环码 .....               | 530        |
| 9.4.1 循环码的基本概念 .....        | 530        |
| 9.4.2 BCH 码 .....           | 538        |
| 9.4.3 里德—索洛蒙(RS)码 .....     | 544        |
| 9.4.4 纠突发错误循环码 .....        | 547        |
| 9.4.5 循环码的译码 .....          | 550        |
| 9.5 卷积码 .....               | 559        |
| 9.5.1 基本概念 .....            | 559        |
| 9.5.2 卷积码的描述 .....          | 560        |
| 9.5.3 扩散卷积码 .....           | 568        |
| 9.5.4 维特比(Viterbi)译码 .....  | 571        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.6 检错重传 .....                                  | 577        |
| 9.6.1 发送等候方式(SWARQ) .....                       | 579        |
| 9.6.2 往返重传 N(退 N)方式(GBNARQ) .....               | 580        |
| 9.6.3 选择性重传方式(SNARQ) .....                      | 581        |
| 9.6.4 HEC 方式 .....                              | 583        |
| 9.7 差错控制系统设计的基本步骤 .....                         | 587        |
| 9.7.1 用户要求 .....                                | 587        |
| 9.7.2 差错控制系统的适用性与编码增益 .....                     | 589        |
| 9.7.3 差错控制方式的选择 .....                           | 590        |
| 9.7.4 码的选择及其主要参数的确定 .....                       | 593        |
| 9.8 调制与编码相结合(TCM)技术 .....                       | 598        |
| 9.8.1 基本概念与系统模型 .....                           | 599        |
| 9.8.2 二、四进制调制的无记忆已调信号中使用的卷积码 .....              | 603        |
| 9.8.3 $2^k(k \geq 3)$ 进制调制的无记忆已调信号中所用的卷积码 ..... | 604        |
| 参考文献 .....                                      | 611        |
| <b>第十章 数据传输系统举例</b> .....                       | <b>612</b> |
| 10.1 通过模拟话路的数据传输 .....                          | 612        |
| 10.1.1 MODEM 的一般组成 .....                        | 613        |
| 10.1.2 V 系列 MODEM .....                         | 615        |
| 10.1.3 MODEM 与 DTE 的接口 .....                    | 626        |
| 10.1.4 智能 MODEM .....                           | 632        |
| 10.2 分组无线数据网 .....                              | 647        |
| 10.2.1 概述 .....                                 | 647        |
| 10.2.2 网络结构 .....                               | 649        |
| 10.2.3 分组无线网中的多址方式 .....                        | 652        |
| 10.2.4 分组无线网中的路由算法 .....                        | 663        |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 10.3   | VSAT 数据传输系统 .....   | 667 |
| 10.3.1 | VSAT 数据网的组成 .....   | 668 |
| 10.3.2 | VSAT 系统的工作原理 .....  | 672 |
| 10.3.3 | VSAT 网中的交换 .....  | 676 |
| 10.4   | 对流层散射数据传输系统 .....   | 677 |
| 10.4.1 | 分集接收 .....  | 678 |
| 10.4.2 | 时频相调制系统 .....   | 684 |
| 10.5   | 短波数据传输系统 .....  | 691 |
| 10.5.1 | 多进制传输 .....   | 691 |
| 10.5.2 | 多路并传 .....  | 692 |
| 10.5.3 | 时频调制结合跳频 .....  | 694 |
| 10.5.4 | 短波单边带话路串行数传 MODEM .....   | 704 |
|        | 参考文献 .....  | 706 |
| 附录 A   | 随机脉冲序列的功率谱密度 .....  | 709 |
| 附录 B   | Q 函数与补误差函数 .....  | 713 |
| 附录 C   | 五类部分响应在 N 为最小时的编码多项式 $F(D)$ 、传输函数 $H(\omega)$ 、冲激响应 $h'(t)$ 、 $ H(\omega) $ 与 $h'(t)$ 的曲线以及输出的电平数 $M$ ..... | 717 |
|        | 英汉名词对照表 .....   | 718 |

# 第一章 概论

通信的目的是传输含有信息的信息。消息有多种形式,如语音、文字、数据、符号、图像等等都是消息。原始的数据信号有两种基本形式:一种是模拟的,另一种是数字的。模拟数据信号(如某些物理量的测量结果,模拟计算机的输出)是在某一数值范围内可以连续取值的信号。数字数据信号(如数字计算机输出,数字仪表的测量结果)是只取有限个离散值的数字序列。由于数字数据更便于存储、处理和传输,而模拟数据经过抽样、量化和编码,可以转换成数字数据,因而模拟数据的传输,在今天,只是在特定条件下(如简化设备)才被采用。本书所说的数据,指的是具有离散形式的并由字母、符号、数码等表示的信息。而在研究具体的传输问题时,我们常常把数据限定为数字计算机和其他数字设备输出的二进制代码。

利用电信号把数据从一个地方传送到另一个地方的过程,称为数据传输。数据通信包括数据传输和数据在传输前后的处理(如数据集中、数据交换等)。

半个世纪以来,在电信领域中,电话业务一直占主导地位,它属于人与人之间的通信。近年来,数据业务的发展非常迅速,它是机器与机器、机器与人之间的通信。

电子计算机的发展对通信的发展起了巨大的推动作用。计算机和通信的紧密结合,可以构成灵活多样的通信系统,也可构成强有力的信息处理系统,这对社会的发展产生了深刻的影响。数据通信是电子计算机日益广泛应用的必然产物。计算机与它的终端之间需要数据通信,计算机与计算机之间更需要数据通信。此外,在遥测、遥控、遥感、雷达、自动控制等系统中都要使用电子计算机,因而它们都离不开数据通信。

## 1.1 数据传输系统的组成及其主要指标

如图 1.1 所示,数据传输系统包括三大部分:传输信道、发送设备与接收设备。系统的任务是把数据按规定的准确度和速度,从一地传送到另一地。系统的输入是待传输的数据,它们来自数据源(终端设备或带有通信接口的计算机),通常是二进制的数字序列,又叫做比特流。

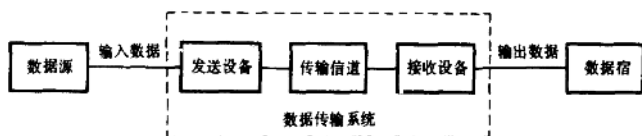


图 1.1 数据传输系统的组成

传输信道提供两地之间的传输通路。它可能是由电缆或光纤等构成的有线线路,也可能是由地面微波接力或卫星中继等构成的无线线路,还可能是有线与无线线路的结合。传输信道给数据信号提供通路,又会使信号产生畸变和带来噪声与干扰,其结果是使得数据在传输后产生差错。传输信道还会限制信息传输速率。

在发送设备中,要把输入数据变换为适合于信道传输的信号波形,这一变换过程称为调制。调制的主要作用之一是使发送信号的频谱与信道的频带相匹配,并提高数据在传输过程中的抗干扰能力。

在接收设备中,要完成与发送端相反的变换。信道输出的是带畸变的信号与干扰噪声的混合波形,接收设备对这种混合波形进行处理,从中恢复出数据,这一过程称为解调。通过解调所再生的数据,不可避免地包含着差错。差错有多有少,在正常情况下,它不应该超过规定的数值。

在讨论数据传输的主要技术问题之前,需要明确一个传输系统的好坏应用哪些指标去衡量。从工程实践中提出的主要技术指标有传输速率、差错率、可靠性与经济性等等。

## 一、传输速率

传输速率是衡量系统传输能力的主要指标。它有以下几种不同的定义:

(1) 码元传输速率 携带数据信息的信号单元叫做码元。每秒钟通过信道传输的码元数称为码元传输速率,记作  $r_s$ ,单位是波特(Bd),简称波特率。码元传输速率又称调制速率。

(2) 比特传输速率 每秒钟通过信道传输的信息量称为比特传输速率,记作  $r_b$ ,单位是比特/秒(bit/s),简称比特率。

(3) 消息传输速率 每秒钟从数据源发出的数据比特数(或字节数)称为消息传输速率,单位是比特/秒(或字节/秒),简称消息率,记作  $r_m$ 。

码元传输速率与比特传输速率具有不同的定义,不应混淆,但是它们之间有确定的关系。对二进制来说,每个码元的信息含量为1bit,因此,二进制的码元传输速率与比特传输速率在数值上是相等的。对于  $M$  进制来说,每一码元的信息含量为  $\log_2 M$  比特,因此,如果码元传输速率为  $r_s$  波特,则相应的比特传输速率为

$$r_b = r_s \log_2 M (\text{bit/s}) \quad (1.1-1)$$

式中  $M$  为大于等于2的整数。

消息传输速率与比特传输速率的关系是

$$r_m = \eta r_b (\text{bit/s}) \quad (1.1-2)$$

式中  $\eta$  是传输效率。

通常在传输数据的过程中,总要加入一些多余度,这些多余的比特携带的不是数据信息,而是为数据可靠传输服务的信息,因而传输效率  $\eta$  总是小于1的。

需要传输的比特率有高有低,范围非常宽,低的每秒几比特,高的达每秒几百兆比特,甚至若干千兆比特。通常把300bit/s以下的比特率称为低速,300~2400bit/s的比特率称为中速,2400bit/s以上的比特率称为高速。一般在面向终端的局部网中,多采用低速和中

速传输,而在计算机网中,为了快速交换和传输信息,需要用每秒几兆~几十兆的高速传输。

提高传输速率受信道特性和设备复杂性的限制。CCITT 建议:通过话路(通带为 300~3400Hz)传输的比特速率为  $600N\text{bit/s}$ ,其中  $N$  为 1~18 的整数。在所建议的速率中,优先选用的速率为 600, 1200, 2400, 3600, 4800, 7200, 9600 和 14400bit/s。如果利用数字电话信道(PCM)传输数据,则每路的比特传输速率可达 56kbit/s(或 64kbit/s)。

## 二、差错率

差错率是衡量传输质量的重要指标之一。

(1) 码元差错率 指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例(平均值),简称误码率。当统计的码元数很大时,它与理论上的码元差错概率很接近,故用同一符号  $P_e$  表示。

(2) 比特差错率 指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例(平均值)。当统计的比特数很大时,它与理论上的比特差错概率很接近,故用同一符号  $P_{eb}$  表示。 $P_{eb} = 10^{-4}$ ,意味着,平均每传送 10000 个比特,要发生一个比特的差错。在二进制传输中,码元差错率即是比特差错率,而在多进制传输中,通过一定的转换运算,可以由码元差错率求得比特差错率。

(3) 码组差错率 指在传输的码组总数中发生差错的码组数所占的比例(平均值)。码组差错率与比特差错率也存在一定的关系。

数据传输的使用者最关心的是比特差错率。对比特差错率的具体要求,决定于不同的应用场合。在传送人的书信(即电报)时,允许的比特差错率约为  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ,而传送计算机数据时,一般要求比特差错率小于  $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 。

为了使差错率满足使用要求,在数据传输系统的各个部分需要采取一系列的措旆,这些将在下一节进行讨论。

### 三、可靠性

可靠性是衡量传输系统质量的一个重要指标。传输系统的可靠性常用可靠度与中断率来衡量。

(1) 可靠度 指在全部工作时间内系统正常工作时间所占的百分数,记作  $P_r$ 。

(2) 中断率 指在全部工作时间内传输中断时间所占的百分数,记作  $\epsilon$ ,显然  $\epsilon = 1 - p_r$ 。

传输中断的原因可能是设备发生了故障,也可能是传输媒质(如电波传播)发生了问题。因此,应该明确区分设备可靠性与传输媒质可靠性,并把总的可靠性指标在两者之间作合理的分配。

设备可靠性决定于很多因素。它不仅与工艺基础和元器件的质量有关,与设计者的理论水平和实践经验有关,而且还与使用维修人员的技术水平、维护条件和责任心有关。因此,从设计传输系统的角度考虑,除采用先进合理的技术、选用高可靠的元器件和设备以外,还应该使设备的使用与维修尽可能简单。在设备比较复杂的系统中,设置故障检测系统是实现故障诊断的好方法。另外,在允许的条件下,对某些关键设备,甚至整个传输系统给予备份,也是提高可靠性的有效措施。

提高传输设备对环境的适应性也是提高可靠性的一个方面。当环境条件(如温度、湿度、震动、冲击等)在一定范围内变化时,系统应保持正常工作。在一般情况下,野外设备的环境条件劣于室内设备,移动设备的环境条件劣于固定设备。

传输媒质可靠性主要决定于传输媒质的特性,在选择信道和设计计算信道设备参数时须予以充分注意。其详细讨论见第二章。

顺便指出,可靠性也是数据网设计中要考虑的主要问题。网络的结构应保证在网络的个别节点或个别链路发生故障时,仍能通过其他路由维持全网正常通信。



#### 四、功率利用率与频带利用率

功率利用率用“保证比特差错率小于规定值所要求的最低归一化信噪比(每比特信号的能量  $E_b$  和噪声单边功率谱密度  $N_0$  的比值)”来衡量。要求的信噪比越低,功率利用率越高,反之则越低。

频带利用率用“单位频带内允许的最大比特传输速率”来衡量,单位是比特/(秒·赫),记作  $\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。在频带宽度相等的条件下,比特传输速率越高,频带利用率越高,反之则越低。

功率利用率与频带利用率主要决定于调制解调方式。一般说来,在选择调制解调方式时应兼顾二者。如果在某些系统中,功率是最宝贵的,则可以适当牺牲频带利用率来提高功率利用率。反之,若频带是最宝贵的,则应着重于提高频带利用率,而允许适当降低功率利用率。

#### 五、经济性

设备费用是设计传输系统的主要制约因素之一,传输系统的设计者总是力图以最少的费用来获得最好的性能。一般用性能价格比来衡量传输系统的经济性。例如,在比特差错率及可靠性这两项质量指标一定的条件下,可以用每一秒钟内把一比特传输一公里所需的费用作为经济指标。

一般地说,设备越复杂,所需的费用越高。但是设备费用与设备复杂程度之间的关系并不是很简单的。由于大规模集成电路和微处理器的飞跃发展,数字处理设备的成本急剧下降,而可靠性大大提高。但是,另一方面,信道设备(如电缆、同轴电缆、天线、收发信机等)的成本却下降缓慢。因此,从系统全局考虑,应该在可能的条件下,以增加数字处理设备的复杂性来换取信道更有效的利用。

除上述几个主要指标要求外,实际上,还可能对传输系统提出这样那样的要求,这里不再一一罗列。

最后指出,传输系统各项指标的实现,往往会碰到困难或存在着