

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

宽带网络 技术 (第2版)

申普兵 主编

赵卫伟 王芳 马中江 杨季可楠 编著

Broadband Network
Technology (2nd Edition)

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS


精品系列

21世纪高等院校信息与通信工
21st Century University Planned Textbooks of Information and Com

宽带网络 技术 (第2版)

申普兵 主编

赵卫伟 王芳 马中江 杨季可楠 编著

Broadband Network
Technology (2nd Edition)

人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (C I P) 数据

宽带网络技术 / 申普兵主编. -- 2版. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2013.9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-32526-6

I. ①宽… II. ①申… III. ①宽带通信系统—计算机
通信网—高等学校—教材 IV. ①TN915.142

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第176348号

内 容 提 要

本书共分8章,主要介绍了数据通信基础、计算机网络基础、TCP/IP网络技术、广域网技术、MPLS技术、IP Over SDH技术、宽带网接入技术和宽带网设计方案等知识。涉及宽带网络的技术基础、常用协议和相关产品的典型应用等内容。

本书内容翔实,概念清楚。在叙述时力求深入浅出,并在每章前有重点和难点提示,每章后有小结和习题。

本书为高等院校通信工程和计算机网络等专业的本科生教材,也可供从事通信、计算机网络等工作的技术人员阅读。

-
- ◆ 主 编 申普兵
编 著 赵卫伟 王 芳 马中江 杨季可楠
责任编辑 滑 玉
责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.75 2013年9月第2版
字数: 507千字 2013年9月河北第1次印刷
-

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

进入21世纪以来,人们对图像、视频、声音、文字、动画等多媒体宽带业务需求的不断增长,促进了带宽网的飞速发展,许多新技术、新装备在宽带网中得到应用,宽带网向人们展示了巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

对于计算机网络、通信等相关专业的学生来说,系统地学习宽带网知识、掌握宽带网技术、运用宽带网设备成为非常重要的需求。为此,我们重新对本书进行了编写。

本书是在2004年第1版的基础上,结合作者多年来从事网络教学和科研的心得体会,以及十多年来宽带网络技术的最新发展修订而成的。修订中作者在内容上进行了较大的更新,在结构上做了必要的调整。

相对于第1版,本书新增了无线局域网、MACA、组播协议、QoS、MPLS VPN、Ethernet over SDH、PTN和H3C公司主要宽带网设备等新的、热点的技术知识,更新了IPv6、中兴和Cisco公司宽带网设备等内容,对DDN、ATM和IP Over ATM等部分内容进行了大幅调整。结构上,我们将第1版第2章第4节广域网技术、第4章ATM网络技术和第5章IP Over ATM技术合并为一章,并对与ATM相关的内容进行了压缩,将第1版第1章第2节中的传输技术合为一个内容。调整后的内容和结构更符合当前宽带网络技术的现状。

本书主要内容包括:第1章介绍了数据通信基础知识,包括数据通信网的组成、分类和特点,数据通信网中使用的传输技术、复用技术、交换技术和差错控制技术。第2章介绍了计算机网络基础知识,包括计算机网络的组成、分类和体系结构,局域网的概念、模型、LLC子层和MAC子层,以及以太网、令牌环网和无线LAN等各种局域网技术。第3章介绍了TCP/IP网络技术,包括TCP/IP体系结构、网际协议IP、传输控制协议TCP、用户数据报协议UDP、常见的路由选择协议RIP、OSPF、IS-IS和BGP,IPv6和QoS技术。第4章介绍了广域网技术,包括广域网的基本概念和广域网中使用的FR、ISDN、ATM以及IP Over ATM技术。第5章介绍了MPLS技术,包括MPLS技术的工作原理、体系结构和技术特点、转发等价类的定义、标记分发协议和MPLS VPN。第6章介绍了IP over SDH技术,包括SDH的基本原理,IP Over SDH分层结构以及PPP、HDLC、Ethernet Over SDH、IP Over DWDM和PTN等技术。第7章介绍了宽带接入技术,包括接入网的定义和界定、分层模型、接口与业务、分类等基本概念,有线接入技术中介绍了铜线接入技术、光纤接入技术和混合光纤/同轴电缆接入技术;无线接入技术中介绍了固定无线接入和移动接入网。第8章介绍了几种宽带网解决方案和部分宽带网络设备使用指南,包括中兴、H3C、Cisco等公司的宽带网设备。

本书的特点是:

1. 系统性强, 知识面广。本书按照宽带网络的技术基础、宽带网络使用的技术与协议和部分厂商宽带网络相关设备的典型应用等进行内容的组织, 并辅以 IPv6、MPLS、PTN 和宽带网络设计方案等内容, 符合从理论到实际的认知需求。

2. 内容适当, 条理清晰。本书充分体现了高等教育理论知识的系统性和技术实用性, 各章开头有学习本章的重点和难点说明, 结尾有对本章学习内容的小结和习题, 可以帮助读者循序渐进地系统掌握宽带网络技术的知识。

3. 内容图文并茂, 语言简明流畅, 避免了抽象晦涩的理论陈述, 可读性强。

我们在本书的编写过程中充分考虑到该课程的教学特点, 力求使本书既可作为计算机网络、通信、电子、信息管理等相关专业本科生学习使用的教材, 也可作为相关领域研究人员和专业技术人员的参考书。本书作为高等院校教材使用时, 授课时间约 60 学时。

全书由申普兵负责统稿和审校工作。赵卫伟、王芳、马中江和杨季可楠参加了编写工作。

由于作者水平有限, 加之宽带网络技术发展非常迅速, 虽然努力做到最好, 但书中肯定还存在不少疏漏之处, 敬请广大读者批评指正, 以便使教材质量不断提高。

编 者

2013 年 5 月

目 录

第 1 章 数据通信基础	1	2.3.1 局域网基本概念	58
1.1 数据通信网的组成	1	2.3.2 局域网参考模型	61
1.1.1 数据通信网的组成和分类	1	2.3.3 LLC 子层	63
1.1.2 数据通信系统的构成	4	2.3.4 MAC 子层	67
1.1.3 数据通信的特点	5	2.3.5 IEEE 802.3: 以太网	74
1.1.4 数据通信的主要性能指标	6	2.3.6 IEEE 802.5: 令牌环	81
1.2 数据通信网传输技术	9	2.3.7 光纤分布式数据接口	83
1.2.1 传输介质	10	2.3.8 虚拟局域网	85
1.2.2 信道容量	15	2.3.9 无线局域网	87
1.2.3 通信方式	17	小结	94
1.2.4 传输技术	18	习题	95
1.2.5 信道复用技术	22	第 3 章 TCP/IP 网络技术	96
1.3 数据通信网交换技术	23	3.1 TCP/IP 技术	96
1.3.1 电路交换	24	3.1.1 TCP/IP 简介	96
1.3.2 报文交换	25	3.1.2 常用的 TCP/IP 协议	96
1.3.3 分组交换	26	3.1.3 TCP/IP 中的几个概念	98
1.3.4 三种交换技术的比较	29	3.2 网际协议	99
1.4 数据差错控制技术	29	3.2.1 IP 的功能	100
1.4.1 差错类型及差错控制方法	29	3.2.2 IP 数据报格式	100
1.4.2 纠错编码的基本原理	30	3.2.3 IP 地址	104
1.4.3 奇偶监督码	33	3.2.4 网际控制协议	106
1.4.4 循环码	36	3.3 传输控制协议	107
小结	38	3.3.1 TCP 的特点	108
习题	39	3.3.2 TCP 数据报格式	109
第 2 章 计算机网络基础	41	3.3.3 TCP 连接机制	112
2.1 计算机网络的组成与分类	41	3.4 用户数据报协议	113
2.1.1 计算机网络的产生与发展	41	3.4.1 UDP 的应用	113
2.1.2 计算机网络的定义与功能	44	3.4.2 UDP 报文格式	113
2.1.3 计算机网络的分类与应用	46	3.4.3 TCP/UDP 协议端口	113
2.2 计算机网络体系结构	46	3.5 路由选择协议	114
2.2.1 网络体系结构的基本概念	47	3.5.1 路由器的工作原理	114
2.2.2 ISO/OSI 网络体系结构	53	3.5.2 路由选择方式	115
2.2.3 Internet 网络体系结构	56	3.5.3 路由协议分类	115
2.3 局域网技术	58	3.5.4 路由选择算法	116

3.5.5 路由选择信息协议	116	4.4.6 IP Over ATM	173
3.5.6 开放最短路径优先协议	117	小结	177
3.5.7 中间系统-中间系统路由 协议	118	习题	178
3.5.8 边界网关协议	120	第5章 MPLS 技术	180
3.6 组播协议	121	5.1 MPLS 简介	180
3.6.1 IP 分组类型	121	5.1.1 MPLS 的发展	180
3.6.2 密集模式	122	5.1.2 MPLS 标准	182
3.6.3 稀疏模式	123	5.1.3 MPLS 的特点	182
3.7 IPv6 协议	124	5.2 MPLS 技术	183
3.7.1 IPv6 数据报格式	124	5.2.1 MPLS 体系结构	183
3.7.2 IPv6 扩展首部	126	5.2.2 MPLS 工作原理	184
3.7.3 IPv6 的安全机制	128	5.2.3 转发等价类	192
3.7.4 移动 IPv6	129	5.2.4 标签分发协议	195
3.7.5 IPv4 向 IPv6 过渡	132	5.3 MPLS VPN 技术	198
3.8 QoS 技术	135	5.3.1 MPLS VPN 的基本概念	198
3.8.1 QoS 概述	135	5.3.2 MPLS VPN 的工作原理	199
3.8.2 QoS 服务模型	136	小结	204
小结	138	习题	205
习题	138	第6章 IP Over SDH 技术	207
第4章 广域网技术	140	6.1 SDH 基本原理	207
4.1 广域网的基本概念	140	6.1.1 SDH 的特点	207
4.1.1 广域网参考模型	140	6.1.2 SDH 的基本知识	208
4.1.2 广域网的构成	141	6.1.3 SDH 网络设备	214
4.1.3 广域网路由技术	141	6.1.4 SDH 传输网	216
4.2 帧中继	144	6.2 IP Over SDH 技术	219
4.2.1 帧中继概述	144	6.2.1 IP Over SDH 网络分层结构	219
4.2.2 帧中继的标准与协议	145	6.2.2 点到点协议	220
4.2.3 帧中继的基本呼叫控制	147	6.2.3 高级数据链路控制规程	222
4.2.4 帧中继用户接入	148	6.2.4 IP Over SDH 的帧结构	225
4.3 综合业务数字网	149	6.3 Ethernet Over SDH 技术	226
4.3.1 窄带综合业务数字网	149	6.3.1 LAPS 协议	227
4.3.2 宽带综合业务数字网	152	6.3.2 GFP 协议	229
4.4 ATM 网络技术	153	6.4 DWDM 技术	232
4.4.1 ATM 的基本概念	154	6.4.1 DWDM 传输系统	232
4.4.2 ATM 协议参考模型	156	6.4.2 DWDM 系统结构	235
4.4.3 ATM 的信元传输方式	163	6.4.3 IP Over DWDM 技术	236
4.4.4 ATM 的交换	165	6.5 分组传送网技术	244
4.4.5 ATM 网络管理	168	6.5.1 PTN 的基本概念	244
		6.5.2 PTN 的网络分层结构	244

6.5.3 PTN 的网元分类及其功能 结构	246	7.3.1 固定无线接入网	276
6.5.4 PTN 的以太网二层业务 接入	247	7.3.2 移动接入网	280
小结	249	小结	289
习题	250	习题	289
第 7 章 宽带网接入技术	251	第 8 章 宽带网设计方案	291
7.1 接入网的基本概念	251	8.1 中兴公司宽带网系列设备	291
7.1.1 接入网的定义和界定	251	8.1.1 典型骨干核心设备	291
7.1.2 接入网的分层模型	252	8.1.2 典型宽带接入设备	297
7.1.3 接入网的接入类型	253	8.2 H3C 公司主要宽带网设备	301
7.1.4 接入网的接口与业务	253	8.2.1 典型骨干核心设备	301
7.1.5 接入网的管理控制和运行	254	8.2.2 典型宽带接入设备	306
7.1.6 接入网的分类	256	8.3 Cisco 公司主要宽带网设备	309
7.2 有线接入网	257	8.3.1 典型骨干核心设备	309
7.2.1 铜线接入网	257	8.3.2 典型宽带接入设备	314
7.2.2 光纤接入网	266	小结	316
7.2.3 混合光纤/同轴电缆接入网	274	习题	317
7.3 无线接入网	276	附录 本书主要英汉缩略语对照	318
		参考文献	324

【本章内容简介】宽带网络的技术基础是数据通信技术和计算机网络技术。本章主要介绍数据通信的基础知识，内容包括：数据通信的基本概念，数据通信网中常用的传输技术和交换技术，信道复用技术和数据的差错控制技术。

【本章重点难点】本章重点是数据通信系统的构成、特点和主要性能指标，数据通信网中常用的传输技术和交换技术，信道复用技术和数据的差错控制技术。难点是分组交换技术和循环码。

1.1 数据通信网的组成

数据通信网由数据终端、传输、交换和处理等设备组成，用以数据的传输、交换与处理，管理人员会利用各种技术尽可能地提高网内各种设备的利用率，以获得网内资源（包括通信线路、硬件、软件数据库等）的共享。本节着重叙述数据通信网的组成和分类，数据通信系统的构成，数据通信的特点和数据通信的主要性能指标等 4 个问题。

1.1.1 数据通信网的组成和分类

1. 数据通信网的组成

数据通信网是一种使用转接交换设备和传输链路，将处于不同地理位置的数据终端设备互连起来，实现通信和信息交换的网络，如图 1.1 所示。

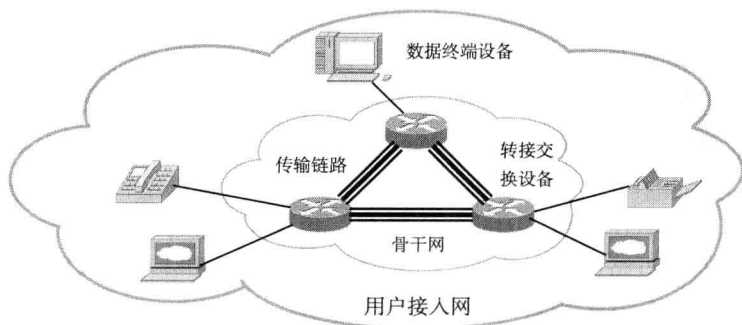


图 1.1 数据通信网的组成

转接交换设备是现代数据通信网的核心,也称其为网络节点,其首要功能是为信息提供交换,并具有信息的存储、转发等功能;其次是选择路由,并为各子网提供接口;最后是进行信息流控制,为避免信息拥塞和有效地利用网络资源,节点之间必须实行流量控制;最后一个功能是实施网络的监视和管理。

传输链路是网络节点的连接介质,是信息和信号的传输通路。目前电信网中传输链路的实现方式主要有:实线传输链路方式,频分传输链路方式,时分数字传输链路方式,码分传输链路方式,波分传输链路方式等。

数据终端设备是数据通信网中的源点和终点。其主要功能是把待传送的信息与在信道上传送的信号进行相互转换。因此,数据终端设备必须具有信号处理功能、协议产生和识别功能。

2. 数据通信网的分类

根据不同的分类方法,数据通信网可以分成很多种类型。

(1) 按服务的对象分类

① 公用数据通信网:即公众网。它是向全社会开放的数据通信网,由国家电信部门经营,是国家电信网的主体。

② 专用数据通信网:它是为满足各专业性行业通信的需要而建设的专用数据通信网。如军队、铁路、石油、水利电力、煤炭等部门自建或向电信部门租用电路建设的专供本部门业务使用的数据通信网。专用数据通信网也是国家数据通信网的重要组成部分。

(2) 按服务的范围分类

① 局域网(LAN):通信距离一般控制在几千米以内,覆盖范围一般是一个房间、一幢大楼、一个校园和一个企业。

② 广域网(WAN):通信距离可达几十至几千千米,也叫远程网。它可以覆盖一个国家或地区,甚至横跨几大洲,形成国际性的远程网。Internet就是典型的广域网。

③ 城域网(MAN):通信距离介于局域网和广域网之间,约为几十千米。城域网的设计目标主要是满足一个城市范围内大量的企业、机关、学校等多个局域网互联的需求。

(3) 按拓扑结构分类

① 总线网:总线拓扑结构采用一个信道(总线)作为传输介质,所有站点通过相应的接口直接连接到这一公共传输介质上,如图1.2(a)所示。任何一个站发送的信号都沿着传输介质传播,而且被所有其他站所接收。

总线拓扑结构的优点是:所需电缆数量少,结构简单,易于扩充,增加或减少用户比较方便。其缺点是:系统范围有限,一般在几公里以内。故障诊断和隔离较困难。在多个站点同时争用总线时,不能保证信息的及时传送。

② 星型网:星型拓扑结构是由中央节点和连接到中央节点的各个站点组成,如图1.2(b)所示。中央节点实行集中式控制,因此相当复杂,并且其地位非常重要。

星型拓扑结构的优点是:控制简单,容易进行故障诊断和隔离。其缺点是:中央节点负担重,易形成瓶颈,一旦发生故障,全网都会受影响。

③ 环型网:环型拓扑结构由站点和连接站点的链路组成一个闭合环,如图1.2(c)所示。环路可以是单向的,也可以是双向的。单向环型网络,数据只沿一个方向传输;双向环型网

络，数据沿两个方向传输。由于多个站点连接在一个环上，因此需要用分布式控制方式进行控制，每个站点都有控制发送和接收的访问逻辑。

环型拓扑结构的优点是：电缆长度短，扩充容易，增加或减少工作站时，仅需简单的连接。其缺点是：节点的故障会引起全网的故障，检测故障较困难。

④ 网型网：网型拓扑结构中，在大多数情况下，一个节点至少和两个以上的节点相连。当所有节点之间均有直达通路连接时，就成为全连通的网型网，如图 1.2 (d) 所示。

网型网拓扑结构的优点是：可靠性高，无瓶颈问题和失效问题。其缺点是：结构比较复杂，成本比较高。

⑤ 混合网：混合网一般由网型网和星型网组合而成，如图 1.2 (e) 所示。它在流量大的区间采用网型网结构，结合了网型网和星型网的优点，比较经济且有一定的可靠性。

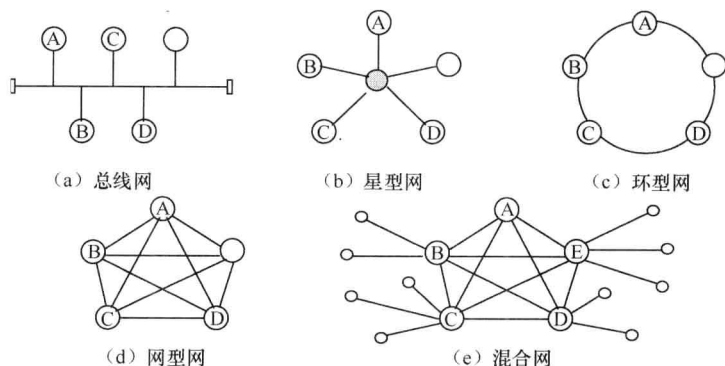


图 1.2 通信网的拓扑结构

3. 数据通信网的发展趋势

通信技术的发展方向是数字化、宽带化、综合化、智能化、个人化和标准化。

数字化就是在数据通信网上全面使用数字技术，包括信息的数字化以及传输和交换的数字化等。其中首要的是信息的数字化。信息数字化后，有利于计算机对信息进行处理、传输和控制。从 20 世纪 80 年代开始，发达国家的数据通信网开始以较快的速度全面实现数字化。

宽带化是适应人们对信息的需求量的增加而出现的，只有通过宽带高速信道，质量达到演播室水平的语音信号、高清晰度视频信号和高速的数据信号才能在网上传送。宽带化一般指传输速率在每秒几百兆比特以上的高速传输和交换。

综合化包括两重含义，即业务综合和网络的融合。前者指语音、数据、图像等各种业务的综合；后者指电信网、计算机网、电视网等各种网络的融合。

智能化是指在数据通信网中引入更多的智能部件，构成智能网 (IN)，从而提高网络和业务的应变能力。它可以对网络资源进行动态分配，随时提供满足各类用户需要的业务。智能网是一种网络体系结构，它是在基础数据通信网络之上附加一个网络层，将网络的交换功能与控制功能相分离，将“智能”集中到新设的功能部件——智能网业务控制点 (SCP) 上。智能网为快速灵活地提供智能业务提供了很好的基础。

个人化即个人通信，指无论任何人，在任何时候，位于任何地方，都能自由地与世界上其他任何人进行通信。

标准化是指在数据通信网的发展中，有关机构需不断制定或修订全国乃至国际统一的数据通信网络标准。只有这样才能保证各国甚至全世界的网络技术标准的统一，以保证各国电信网用户乃至全球电信网的用户之间能够顺利地进行通信。

1.1.2 数据通信系统的构成

数据通信系统是通过数据电路将分布在远地的数据终端设备与计算机系统连接起来，实现数据传输、交换、存储和处理的系统。是组成数据通信网的基础。典型的数据通信系统主要由中央计算机系统、数据终端设备（DTE）、数据电路三部分构成，如图 1.3 所示。

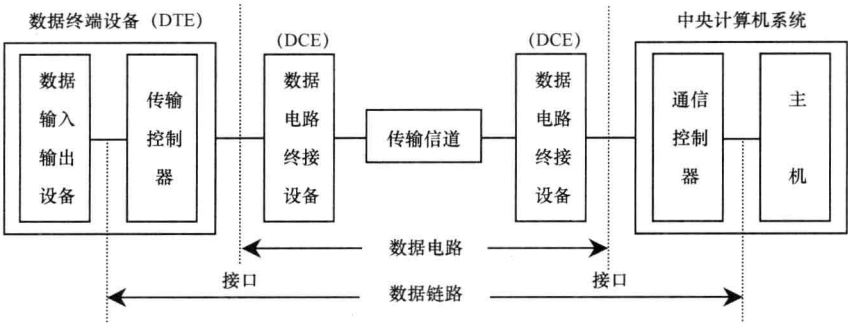


图 1.3 数据通信系统的基本构成

1. 数据终端设备

数据终端设备（Data Terminal Equipment, DTE）由数据输入设备（产生数据的数据源）、数据输出设备（接收数据的数据宿）和传输控制器组成。

DTE 在数据通信中的作用有点类似于电话与电报通信中的电话机和电传机，它把信息变成以数字代码表示的数据，并把这些数据输送到远端的中央计算机系统。同时，可以接收远端中央计算机系统的处理结果——数据，并将它变为原始的信息。

在不同的场合，DTE 可以是不同的设备。例如，在发送数据中，DTE 可以是键盘输入器；在接收数据中，它可以是屏幕显示设备，也可以是激光打印机等。当然，具有一定功能的个人计算机也可称为 DTE。

2. 数据电路

数据电路由传输信道（传输线路）及其两端的数据电路终接设备（Data Circuit Terminating Equipment, DCE）组成。

数据电路位于 DTE 与中央计算机系统之间，它的作用是将 DTE 或中央计算机系统送出的数据信号变换成适合各种传输介质传输的信号。在数据电路两端收发的是二进制“1”或“0”的数字数据信号。

传输信道包括通信线路和通信设备。通信线路一般采用电缆、光缆、微波等传输介质。通信设备又可分为模拟通信设备和数字通信设备，从而使传输信道分为模拟传输信道和数字传输信道。

DCE 是 DTE 与传输信道的接口设备。发方的 DCE 有两项功能：一是将来自 DTE 的数字信号进行变换，消除原数据信号内的直流分量，使信号功率谱与信道相适应，防止数据信号中有长串“1”或“0”码时，可能导致收发双方的失步；二是当传输信道为模拟信道时，将来自 DTE 的基带数据信号调制载频信号，变为频带信号，实现频带传输。收方的 DCE 施行与发方相反的功能。调制解调器（Modem）是最常见的 DCE。发送时，调制器把数字数据信号转换成适合于模拟信道上传输的模拟信号；接收时，模拟信号由解调器将它还原成数字数据信号，并送到 DTE。当数据信号在数字信道上传输时，DCE 的位置上不再需要 Modem，而改为数据服务单元（Data Service Unit, DSU）。DSU 的功能是完成信号格式变换（即消除信号中的直流成分和防止长串零的编码）、信号再生和定时等。另外，如果数据信号直接在电缆中传输，称为基带传输，此时 DCE 只需要第一项功能。

3. 中央计算机系统

中央计算机系统由通信控制器（或称前置处理机）、主机及外围设备组成，具有处理从 DTE 输入的数据信息，并将处理结果向相应的 DTE 输出的功能。

通信控制器（或称前置处理机）是数据电路和中央计算机系统的接口，控制与远程 DTE 连接的全部通信信道，接收远程 DTE 发来的数据信号，并向远程 DTE 发送数据信号。通信控制器的主要功能，对远程 DTE 一侧来说是差错控制、终端的接续控制、确认控制、传输顺序控制和切断控制等；对计算机系统一侧来说，其功能是将线路上来的串行比特信号变成并行比特信号，或将计算机输出的并行比特信号变成串行比特信号。另外，在远程 DTE 侧有时也有类似的通信控制功能，但一般作为一块通信控制板合并并在 DTE 中。

主机又称中央处理机，由中央处理单元（CPU）、主存储器、输入输出设备以及其他外围设备组成。其主要功能是进行数据处理。

1.1.3 数据通信的特点

数据通信与传统的电话通信相比，在通信对象、通信内容、可靠性要求、传输效率等方面都有不同之处。

1. 数据通信的对象有机器参与

数据通信是实现计算机和计算机之间以及人和计算机之间的通信，而电话通信是实现人和人之间的通信。尽管计算机具有超越于人的能力，但是计算机不具有人脑的思维能力。计算机完成的每件工作都需要由人预先编好程序，计算机的智能来自人的智能。计算机之间的通信过程需要定义出严格的通信协议或标准。而电话通信就不必如此复杂。

2. 数据传输的可靠性要求高

数据通常以二进制“1”和“0”的组合编码表示，如果一个码组中的一个比特（“1”或“0”）在传输过程中产生错误，则在接收端可能被理解为完全不同的信息，甚至是相反的含义。特别是对于像银行业务或军队指挥信息系统，数据的差错可能引起严重的后果，因此，数据通信要达到很低的误码率。而在传输中发生差错时要求能够自动地进行校正。表 1.1 列出了数据通信和其他一些通信业务对传输误码率的基本要求。

表 1.1 各种通信业务的误码率

通 信 业 务	可接受误码率	可接受误组率
数据	$<10^{-8}$	$<10^{-10}$
语音	$<10^{-2}$	$<10^{-3}$
电视	$<10^{-2}$	$<10^{-3}$
压缩电视	$<10^{-6}$	$<10^{-9}$
图片	$<10^{-4}$	$<10^{-9}$

3. 数据通信的速率变化较大

表 1.2 提供了在各种不同工作环境下数据通信速率的平均值和高峰值。从表中可以看出，数据通信的平均速率相当低，而它们的瞬时高峰速率却可能高出上百倍。为了避免发送和接收数据的时延超过要求，在设计数据通信系统时通信线路的传输速率应当符合高峰速率的要求。从这里我们也可以看出，单一的终端或计算机专用的通信线路，其资源利用率是很低的。这导致了在数据通信网中通信资源共享技术的广泛研究和开发，分组交换就是其中的一项重要成果。从表 1.2 中看出，PCM 数字语音的高峰速率大约只是平均值的 3 倍，比数据通信的速率变化小得多。

表 1.2 不同工作环境的数据通信速率

工 作 环 境	平均速率 (bit/s)	高峰速率 (bit/s)
终端到计算机	1	100
计算机到终端	10	10 000
远程作业录入	100	10 000
计算机到计算机	10 000	1 000 000
PCM 数字语音	20 000	64 000

4. 数据通信网应提供足够灵活的接口能力

数据通信的“用户”是各种各样的计算机和终端设备，它们在通信速率、编码格式、同步方式和通信规程等方面都会有很大的差异。为了能够实现它们之间的互相通信，数据通信网应当提供足够灵活的接口能力，以适应各种“用户”的需要。

5. 数据通信的信息传输效率很高

例如，在一条模拟电话信道上以 2 400 bit/s 的速率传输数据是很容易实现的，每分钟可以传输 18 000 个字符。在一条数字电话信道（0 次群）以 48 kbit/s 速率传输数据，每分钟可以传送 360 000 个字符，相当于 150 页文件（每页 2 400 个字符）。使用电话通信方式不可能在一分钟内传输如此大的信息量。由此可见，数据通信的经济性不言而喻。而且由于数据比语音更容易在计算机中存储、处理、转发。因此，数据通信给人类带来的变化和效益是电话通信难以比拟的。

1.1.4 数据通信的主要性能指标

在研究设计或者评价一个通信系统时，必然涉及系统的性能指标问题。数据通信系统的

性能指标有很多,涉及电气性能、工艺结构、使用维修、经济效益等等。但最主要的是有效性和可靠性,因为这两个指标基本上体现了对数据通信准确、迅速和不间断的要求。

1. 有效性性能指标

有效性性能指标是衡量系统传输能力的主要指标,通常从码元速率、信息速率、数据传送速率、功率利用率和频带利用率等方面来评估。

(1) 码元速率(或称调制速率)

每秒钟传输数据信号码元的数目称为码元速率。单位为波特(B),用符号 R_B 表示。

虽然数字信号有多进制与二进制之分,但码元速率与信号的进制无关,它只与码元宽度 T 有关。例如,某 N 进制信号,其码元宽度为 T ,每秒钟码元的数目为 $1/T$,故码元速率 $R_B=1/T$ (B)。

图 1.4 给出了四个数据信号。其中图(a)和图(b)为基带信号,图(c)和图(d)为已调信号。图(a)为二电平信号,即一个信号码元中可能有两种状态(± 1);图(b)为四电平信号,它在一码元 T 中可能取四种不同的状态(± 3 和 ± 1),因此,每个信号代码可以代表四种情况之一,即可以表示 2 个传输代码的 $4(2^2=4)$ 种组合;图(c)为二进制调幅波(2ASK 信号);图(d)为四进制调幅波(4ASK 信号)。如果这四个数据信号码元时间长度 T 相同,则它们的码元速率相同。

若 $T=833 \times 10^{-6}$ s,则码元速率 $R_B=1/T=1/833 \times 10^{-6} \approx 1\,200$ B。

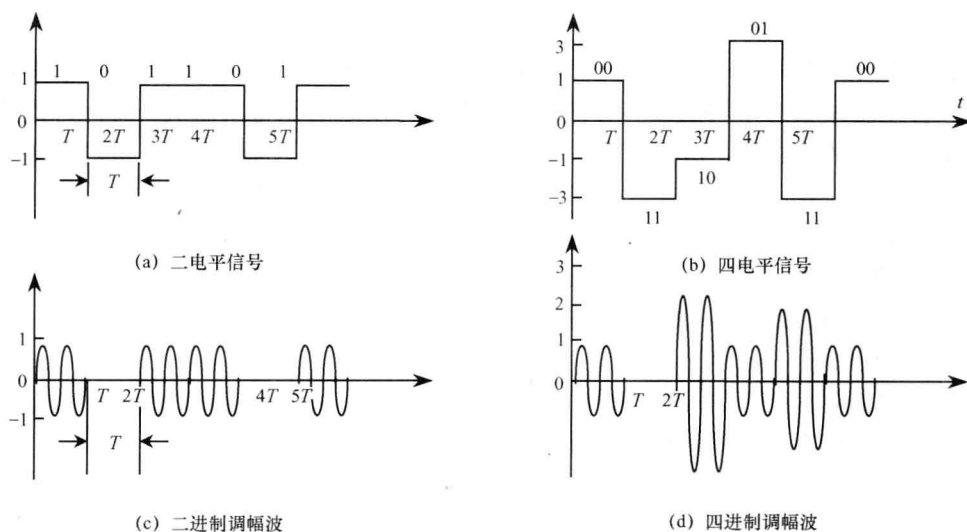


图 1.4 数据信号举例

由此可见,对于码元速率,不论一个码元中信号有多少状态,只计算 1 秒钟内数据信号的码元个数。

(2) 信息速率(或称数据传信速率)

每秒钟传输的信息量称为信息速率。单位为比特/秒(bit/s),用符号 R_b 表示。

bit(比特)是英文 binary digit 的缩写,在信息论中作为信息量的度量单位。信息量是衡量各种不同消息中包含信息多少的标准,通常用符号 I 表示。

一个 N 进制数据信号,每个码元可能出现的状态有 N 个,设每个状态出现的概率 P 是相同的,则 $P=1/N$,在信息理论中,定义每个码元的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 N \quad (\text{bit}) \quad (1.1)$$

因为信息量与数据信号的进制数有关, 因此信息速率也和数据信号的进制数有关。一个 N 进制的数据信号, 其信息速率为

$$R_b = R_B \times I = R_B \log_2 N \quad (\text{bit/s}) \quad (1.2)$$

即等于 N 进制数据信号每秒钟传输的码元个数(码元速率)乘以该信号一个码元所包含的信息量。对于二进制数据信号而言, 码元速率和信息速率在数值上相等, 但它们的单位是不同的。

一般在二进制数据通信中, 如果使用代码“1”和“0”的概率是相同的, 则每个“1”和“0”就含有一个比特的信息量。如果一个数据通信系统, 每秒钟内传输 2 400 个代码, 则它的信息速率记作 $R_b = 2\,400 \text{ bit/s}$ 。二进制数据传输系统的信息速率实际上就是该系统每秒内传输二进制码元的个数。根据实际需要, 信息速率已形成国际标准系列, 一般是按 $2^n \times 150 \text{ (bit)}$ 的算式确定, 式中 n 为正整数。如有 300 bit/s, 600 bit/s, 1 200 bit/s, 2 400 bit/s, ..., 19 200 bit/s 等速率, 也有不按这一等式的速率, 如 14.4 bit/s, 64 kbit/s 等。

(3) 数据传送速率

单位时间内在数据传输系统中的相应设备之间传送的比特、字符或码组平均数称为数据传输速率。单位为比特/秒 (bit/s)、字符/秒或码组/秒。定义中的相应设备常指调制解调器、中间设备或数据源与数据宿。

信息速率与数据传送速率不同。信息速率是传输数据的速率, 而数据传送速率是相应设备之间实际能到达的平均数据转移速率。它不仅与发送的比特率有关, 而且与差错控制方式、通信规程以及信道差错率有关, 即与传输的效率有关。因此, 数据传送速率总是小于信息速率。

数据传输速率的三个定义, 在实际应用上既有联系又有侧重。在讨论信道特性, 特别是传输频带宽度时, 通常使用码元速率; 在研究传输数据速率时, 采用数据传信速率; 在涉及系统实际的数据传输能力时, 则使用数据传送速率。

(4) 功率利用率

数据通信传输系统的功率利用率用系统信噪比来描述。在保证系统传输质量的条件下, 系统所需要的最低归一化信噪比定义为系统的功率利用率。

归一化信噪比是指每比特信号的能量 E_b 和噪声单边功率谱密度 N_0 的比值。显然, 对某特定传输系统而言, 所需的归一化信噪比越低, 功率利用率越高, 反之则越低。

(5) 频带利用率

频带利用率用系统单位频带内所实现的信息传输速率来衡量。表示为

$$\eta = R_b / B \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1.3)$$

式中, B 为系统所需的传输带宽, R_b 为系统的信息速率。显然, 在传输带宽相同时, 若信息速率越高, 则频带利用率越高, 反之则越低。将式 (1.2) 代入式 (1.3), 则有

$$\eta = R_b / B = (R_B \log_2 N) / B \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1.4)$$

若系统的码元速率相同, 通过加大 N 或减少 B 都可使频带利用率提高。前者可以采用多进制调制技术实现; 后者可采用单边调制、部分响应等压缩发送信号频谱的方法实现。

2. 可靠性性能指标

数据通信系统的可靠性主要用差错率来表示。差错率可以有多种定义，在数据通信中，一般采用误码率、误比特率、误字符率（或误码组率）等指标来表示。

(1) 误码率

在系统传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例称误码率。记为

$$p_e = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_e}{n} \quad (1.5)$$

式中， n 是在一定时间内系统传输的码元总数； n_e 是在相同时间内传输中产生的错码数。

(2) 误比特率

系统在传输中发生差错的比特数占传输总比特数的比例称误比特率。记为

$$p_b = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_b}{n} \quad (1.6)$$

式中， n 是在一定时间内系统传输的比特总数； n_b 是在同一时间内传输中产生的错比特数。

对于二进制数据信号，误码率和误比特率相等，而对于多进制数字信号，其误码率总是大于等于误比特率。

(3) 误字符率（或误码组率）

系统在传输中发生差错的字符（码组）数占传输总字符（码组）数的比例称为误字符（码组）率。记为

$$\text{误字符（码组）率} = \frac{\text{传输中发生差错的字符（码组）数}}{\text{传输总的字符（码组）数}} \times 100\%$$

差错率是一个统计平均值，因此在测量和统计时，总的传输码元、比特、字符或码组数应达到一定数量，否则测出的结果将失去意义。

误码率一般用来表示数据传输信道的传输质量，但它并未涉及差错的分布和影响。在实际信道上产生的差错一般有两种类型：一类是独立型差错（或称随机差错）；另一类是突发型差错。前者是单个码元产生的差错，相互间不存在关联，因此它们在时间上的分布可认为是均匀的。后者是突发式成片出现的差错，因此在时间上的分布是不均匀的。这两类不同的差错的形成原因和影响都是不相同的。对于前者，误码率是基本的传输性能指标，只要知道了误码率和码组的长度，就可以推算出误码组率，对于后者，情况就不同了。在出现一次突发差错时，虽然很可能导致多个码元的错误，但它们往往集中在同一个码组或相邻几个码组中，对于误码组率来说，其影响要比前一类均匀分布的差错造成的影响小。由于实际的传输均以字符或码组为单位，因此，对于传输效率来说，在采用特定的差错控制方式下，误字符率（或误码组率）往往具有更重要的意义。

1.2 数据通信网传输技术

数据传输技术是数据通信网的重要技术之一。数据信号的传输是数据通信的基础，它主要与传输介质和传输方式有关。本节主要对传输介质、传输信道、通信方式、传输方式和复用方式进行分析和介绍。