

教育部大学计算机课程改革项目成果  
工业和信息化部所属高校联盟推荐教材

# 计算机网络与网络计算

俞研 徐雷 唐玲 陆一飞 编著  
张功萱 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

教育部大学计算机课程改革项目成果  
工业和信息化部所属高校联盟推荐教材

# 计算机网络与网络计算

俞 研 徐 雷 唐 玲 陆一飞 编著

张功萱 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要介绍了数据通信与计算机网络的原理和方法,详细讨论了计算机网络与网络计算所涉及的信道、数字信号传输、同步、差错控制和多路复用等数据通信理论知识,以及网络体系结构、物理层、链路层、网络层、传输层和应用层等网络协议与技术,最后介绍了并行与分布式计算、云计算和软件定义网络SDN等网络新技术。本书内容系统全面,贯穿了计算机网络与网络计算所涉及的主要知识,并涵盖了计算机网络发展的最新研究成果,力求使读者通过本书的学习既可以掌握计算机网络的基础理论和实用技术,也能够了解本学科最新的发展方向。

本书可作为高等学校相关专业本科生和研究生深入了解计算机网络与网络计算的专业书籍与教材,也可以作为从事数据通信与计算机网络工作的工程技术人员的参考读物。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机网络与网络计算 / 俞研等编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.11

ISBN 978-7-121-24632-6

I. ①计… II. ①俞… III. ①计算机网络—高等学校—教材 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246865 号

策划编辑: 任欢欢

责任编辑: 章海涛

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 554.4 千字

版 次: 2014 年 11 月第 1 版

印 次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.50 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及  
邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

通信与网络技术的飞速发展和广泛应用,使其在社会中的地位和作用越来越重要,社会的数字化、网络化和信息化已成为社会发展的潮流和核心。数据通信、计算机网络与网络计算技术正是支撑网络基础设施的关键和核心技术。

计算机网络与网络计算是一门涉及计算机科学、通信技术、网络技术等多学科和技术的综合性、多学科交叉的技术。

本书包含数据通信、网络协议和网络计算技术三部分。数据通信部分介绍了信道、数字信号传输、同步、差错控制和多路复用等数据通信理论知识,系统讨论了计算机网络所涉及的底层数据通信原理与方法;网络协议部分按照分层设计的原则,详细讨论了网络体系结构、物理层、数据链路层、网络层和应用层所涉及的协议与技术;网络计算技术部分则讨论了并行与分布式计算、云计算和软件定义网络等计算机网络发展的最新研究成果,为读者介绍了网络技术发展的潮流和趋势。

本书在介绍基本概念、原理和方法的同时,力求做到内容全面,既涵盖计算机网络所涉及的通信原理和网络分层体系结构,也能够反映网络技术的最新发展,强调了内容的递进性、关联性与逻辑性。

本书既可以作为高等学校相关专业本科生和研究生深入了解计算机网络与网络计算的专业书籍与教材,也可以作为从事数据通信与计算机网络工作的工程技术人员参考读物。

本书是由俞研、徐雷、唐玲和陆一飞等作者在长期从事数据通信与计算机网络教学与科研工作的基础上编写而成的。在此书的编写过程中,南京理工大学的张功萱教授、宋斌副教授、付安民副教授和苏钰、刘佳佳等提供了宝贵的建议和有益的帮助,张功萱教授对全文进行了审阅并给予了指导,电子工业出版社的谭海平、章海涛和任欢欢编辑也为本书的出版做了大量的工作,作者对他们表示由衷的谢意。本书在编写过程中参考了国内外的有关著作和文献,在此致以真诚的敬意和衷心的感谢。

本书的配套教学资源有PPT课件等。任课教师和相关读者可以到华信教育资源网进行免费注册下载,网址是<http://www.hxedu.com.cn>。

由于编者水平所限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2014年10月

# 目 录

## 第一部分 数据通信

<b>第 1 章 数据通信基础</b> .....	1	3.1.3 曼彻斯特码 .....	20
1.1 数据通信理论基础 .....	1	3.2 基带信号的频谱 .....	20
1.1.1 时域概念 .....	1	3.3 基带传输系统的组成 .....	21
1.1.2 频域概念 .....	2	3.4 无码间干扰的基带传输 .....	21
1.1.3 傅里叶分析 .....	3	3.4.1 码间干扰及其分析 .....	21
1.1.4 字符的数据表示方法 .....	3	3.4.2 无码间干扰的传输特性 .....	22
1.1.5 有限带宽信号 .....	4	3.5 基带传输系统性能分析 .....	24
1.1.6 信道最大数据传输速率 .....	4	3.6 数据传输系统性能改进的几项措施 .....	25
1.2 数据传输的概念及分类 .....	4	3.6.1 部分响应 .....	25
1.2.1 单工、半双工和全双工 .....	5	3.6.2 时域均衡 .....	27
1.2.2 异步传输和同步传输 .....	5	3.6.3 数据加扰解扰 .....	28
1.2.3 串行传输和并行传输 .....	7	3.7 眼图 .....	29
1.3 交换技术 .....	7	<b>第 4 章 数字信号的频带传输</b> .....	30
1.4 信息及度量 .....	8	4.1 引言 .....	30
<b>第 2 章 信道</b> .....	9	4.2 数字频率调制 .....	31
2.1 引言 .....	9	4.2.1 2FSK 调制 .....	32
2.1.1 信道容量 .....	9	4.2.2 MFSK 的调制 .....	34
2.1.2 信道的分类 .....	10	4.3 数字振幅调制 .....	35
2.2 传输损耗 .....	10	4.3.1 2ASK 调制 .....	35
2.2.1 衰减 .....	11	4.3.2 MASK 调制 .....	37
2.2.2 噪声 .....	11	4.3.3 其他振幅调制技术 .....	38
2.2.3 延迟失真 .....	12	4.4 数字相位调制 .....	39
2.3 无线信道 .....	12	4.4.1 2PSK 调制 .....	39
2.3.1 无线电波和频段划分 .....	12	4.4.2 2DPSK 调制 .....	41
2.3.2 卫星中继信道 .....	13	4.4.3 多进制相移键控 .....	42
2.3.3 无线接力通信 .....	15	<b>第 5 章 同步技术</b> .....	45
2.4 有线信道 .....	15	5.1 相关知识介绍 .....	45
2.4.1 双绞线 .....	16	5.1.1 各种功能的同步 .....	45
2.4.2 同轴电缆 .....	16	5.1.2 同步系统分类 .....	46
2.4.3 光纤 .....	17	5.2 载波同步技术 .....	46
2.4.1 双绞线 .....	16	5.2.1 直接提取载波法 .....	46
2.4.2 同轴电缆 .....	16	5.2.2 插入导频法 .....	48
2.4.3 光纤 .....	17	5.2.3 载波同步的性能指标 .....	49
<b>第 3 章 数字信号的基带传输</b> .....	19		
3.1 数字基带信号 .....	19		
3.1.1 差分码 .....	19		
3.1.2 极性交替码 (AMI 码) .....	20		

5.3	码元同步	49	6.5.1	循环码的循环特性	72
5.3.1	自同步法	50	6.5.2	循环码的生成多项式和生成矩阵	73
5.3.2	外同步法	51	6.5.3	循环码的编码方法	74
5.3.3	码元同步系统的性能指标	52	6.5.4	循环码的解码方法	75
5.4	群同步	52	<b>第7章</b>	<b>多路复用技术</b>	78
5.4.1	连贯式插入法	52	7.1	前言	78
5.4.2	间歇式插入特殊码字同步法	54	7.2	时分多路复用	79
5.4.3	起止式同步法	55	7.2.1	同步时分多路复用原理	79
<b>第6章</b>	<b>差错控制</b>	56	7.2.2	PCM 基群帧结构	80
6.1	差错控制的基本概念及原理	56	7.2.3	PCM 高次群	81
6.1.1	差错控制的基本概念	56	7.3	统计时分多路复用	82
6.1.2	差错控制的基本原理	60	7.3.1	统计时分复用原理	82
6.2	简单的差错控制编码	64	7.3.2	统计时分复用与同步时分复用的比较	82
6.2.1	水平奇偶监督码	64	7.4	码分多路复用	83
6.2.2	奇偶监督码	64	7.4.1	码分多路复用系统原理	83
6.2.3	二维奇偶监督码	65	7.4.2	CDMA 系统的特点	83
6.3	汉明码及线性分组码	65	7.5	频分多路复用	84
6.3.1	汉明码	65	7.5.1	频分多路复用原理	84
6.3.2	线性分组码	67	7.5.2	正交频分多路复用 (OFDM)	85
6.4	卷积码	69	7.5.3	时分复用技术和频分复用技术的比较	86
6.4.1	卷积码的基本概念	69	7.6	密集波分复用	87
6.4.2	卷积码的概率解码	71			
6.5	循环码	72			

## 第二部分 网络协议

<b>第8章</b>	<b>网络体系结构</b>	88	10.1.2	链路层提供的服务	101
8.1	计算机网络体系结构	88	10.1.3	成帧/帧定界	102
8.2	传统网络体系结构中的几大原则	89	10.1.4	差错控制	103
8.3	目前网络体系结构中存在的问题	90	10.1.5	流量控制	104
8.4	下一代网络体系结构初探	92	10.2	差错检测和纠正	105
8.5	本章小结	93	10.3	链路层协议	106
<b>第9章</b>	<b>物理层</b>	94	10.3.1	停止等待协议	106
9.1	物理层协议	94	10.3.2	滑动窗口协议	107
9.2	ATM	96	10.3.3	高级数据链路控制协议	110
9.3	X.21	98	10.3.4	点到点协议 PPP	111
9.4	EIA-232-E	99	10.4	局域网	113
<b>第10章</b>	<b>数据链路层与局域网</b>	100	10.5	以太网	114
10.1	链路层概述	100	10.5.1	概述	114
10.1.1	链路层的简单模型	100	10.5.2	以太网物理地址	115
			10.5.3	以太网帧结构	116



10.5.4	载波侦听多路访问协议 CSMA/CD	117	12.1.1	传输层提供的服务	156
10.6	无线局域网	119	12.1.2	寻址与多路复用	157
10.6.1	802.11 概述	119	12.1.3	传输层协议	158
10.6.2	802.11 物理层	120	12.2	用户数据报协议 UDP	158
10.6.3	802.11 MAC 层协议	121	12.2.1	UDP 概述	158
10.6.4	802.11 的 MAC 帧	124	12.2.2	UDP 用户数据报首部格式	159
10.7	链路层互连	125	12.3	传输控制协议 TCP	160
10.7.1	网桥的工作原理	125	12.3.1	TCP 概述	160
10.7.2	学习网桥	126	12.3.2	TCP 报文段首部格式	161
10.7.3	生成树网桥	126	12.3.3	TCP 连接建立与释放	165
10.7.4	以太网交换机	127	12.3.4	TCP 连接的状态模型	167
12.3.5			12.3.5	TCP 可靠传输	170
12.3.6			12.3.6	TCP 流量控制	173
12.3.7			12.3.7	TCP 拥塞控制	176
<b>第 11 章</b>	<b>网络层</b>	128	<b>第 13 章</b>	<b>应用层</b>	182
11.1	网络层概述	128	13.1	概述	182
11.1.1	存储转发数据包交换	128	13.2	域名系统 DNS	182
11.1.2	网络层提供的服务	128	13.2.1	DNS 概述	182
11.1.3	虚电路和数据报	129	13.2.2	DNS 体系结构	183
11.2	路由选择算法	131	13.2.3	DNS 关键概念	184
11.2.1	优化原则	131	13.2.4	DNS 报文格式	188
11.2.2	最短路径算法	132	13.2.5	DNS 工作原理	190
11.2.3	距离矢量算法	133	13.3	电子邮件	191
11.2.4	链路状态路由算法	134	13.3.1	体系结构与服务	192
11.3	路由选择协议	136	13.3.2	简单电子邮件传输协议 SMTP	193
11.3.1	互联网路由	136	13.3.3	邮件读取协议 POP3 和 IMAP	195
11.3.2	路由信息协议 RIP	137	13.3.4	基于 Web 的电子邮件	196
11.3.3	开放最短路径优先协议 OSPF	137	13.4	万维网 WWW	197
11.3.4	边界网关协议 BGP	139	13.4.1	概述	197
11.4	网络层协议	140	13.4.2	超文本传输协议 HTTP	198
11.4.1	虚拟互连网络	140	13.4.3	超文本标记语言 HTML	201
11.4.2	IP 地址	142	13.5	简单网络管理协议 SNMP	202
11.4.3	IPv4 协议	145	13.5.1	SNMP 概述	202
11.4.4	地址解析协议 ARP 和逆地址 解析协议 RARP	150	13.5.2	SNMP 模型和架构	202
11.4.5	Internet 控制报文协议 ICMP	151	13.5.3	管理信息库 MIB	203
11.4.6	Internet 组管理协议 IGMP	152	13.5.4	SNMP 协议	204
11.4.7	IPv6 协议	153	13.5.5	SNMPv1、SNMPv2 和 SNMPv3	205
<b>第 12 章</b>	<b>传输层</b>	156	13.6	本章小结	206
12.1	传输层概述	156			

## 第三部分 网络计算技术

第 14 章 并行与分布式计算原理	207	15.5 云安全	251
14.1 计算的时代	207	15.5.1 云计算所面临的安全问题	251
14.2 并行与分布式计算的比较	207	15.5.2 云计算安全架构	252
14.3 并行计算基础	208	15.5.3 云计算安全技术	254
14.3.1 什么是并行处理	208	15.6 资源管理	260
14.3.2 并行处理的硬件体系结构	209	15.6.1 虚拟机放置优化算法	261
14.3.3 可扩展的并行计算机体系结构	209	15.6.2 虚拟机资源分配算法	261
14.3.4 并行编程	212	15.6.3 云联邦环境下的资源管理	264
14.3.5 并行算法	214	15.7 云平台	267
14.4 分布式计算	217	15.7.1 Amazon Web Services	268
14.4.1 分布式系统	217	15.7.2 Google AppEngine	272
14.4.2 分布式计算的体系结构风格	223	15.7.3 Microsoft Azure	274
14.4.3 典型分布式计算技术	229	第 16 章 软件定义网络	277
第 15 章 云计算	234	16.1 概述	277
15.1 云计算概述	234	16.1.1 SDN 产生背景	277
15.1.1 云计算简介	234	16.1.2 SDN 概念	278
15.1.2 云计算应用	235	16.1.3 SDN 架构和核心技术	279
15.1.3 云计算发展历程	237	16.2 基于 OpenFlow 的 SDN	280
15.2 云计算体系架构	238	16.2.1 OpenFlow 协议概述	280
15.2.1 基础设施即服务	239	16.2.2 基于 OpenFlow 的 SDN 架构	281
15.2.2 平台即服务	240	16.2.3 OpenFlow 规范	282
15.2.3 软件即服务	241	16.2.4 OpenFlow 交换机和分类	287
15.2.4 服务管理层	242	16.2.5 OpenvSwitch	287
15.2.5 用户访问接口层	242	16.2.6 OpenFlow 存在的问题	288
15.3 云的部署模式	243	16.3 SDN 控制器	289
15.3.1 公有云	243	16.3.1 概述	289
15.3.2 私有云	244	16.3.2 网络操作系统	290
15.3.3 混合云	245	16.3.3 控制器	291
15.3.4 社区云	246	16.4 SDN 应用、现状和挑战	293
15.4 云计算关键技术	246	16.4.1 SDN 应用	293
15.4.1 数据中心节能技术	246	16.4.2 SDN 现状	295
15.4.2 虚拟化技术	247	16.4.3 SDN 的挑战与未来	296
15.4.3 并行编程技术	248	16.5 本章小结	297
15.4.4 分布式存储	249	参考文献	298
15.4.5 服务质量保证机制	250		



# 第一部分 数据通信

## 第 1 章

### 数据通信基础

#### 1.1 数据通信理论基础

所谓数据通信，它的本质就是在两个实体间进行数据的传输与交换。具体来说，它的步骤就是：首先，必须对信源要传输或交换的数据进行编码；然后，再把第一步经过编码的数据通过信道传输至信宿。数据传输质量是由被传输信号的质量和信道所使用的物理介质所决定的。传输的信号是根据自变量而划分的，一般来说，它可以是时间的函数，也可能是频率的函数。当信号的传输以时间为自变量时，我们就称它为信号的时域表示；当信号的传输以频率为自变量时，我们就称它为信号的频域表示。下面我们先简要介绍信号的时域表示及频域表示。

##### 1.1.1 时域概念

有些传输的信号是时间的函数，即当信号的传输以时间为自变量时，可根据信号的幅度是否随时间连续变化，将其分为连续信号和离散信号两类，如图 1-1 所示。

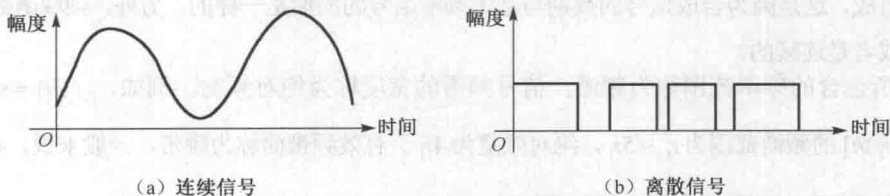


图 1-1 连续信号和离散信号

无论是连续信号还是离散信号，可根据其信号强度是否随时间重复变化，将其分为两类：周期信

号和非周期信号。周期信号的波形图如图 1-2 所示。式 (1-1) 为周期信号的数学表达式:

$$f(h+mP) = f(h) \quad (1-1)$$

其中  $h$  表示时间,  $P$  表示信号周期。

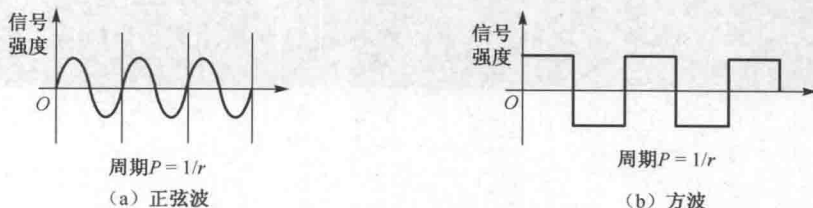


图 1-2 周期信号

作为最基本的连续信号, 正弦波需要用 3 个参量来表示, 即: 正弦波幅度 ( $R$ )、正弦波频率 ( $r$ ) 和正弦波初相角 ( $\theta$ )。

$$f(h) = R \sin(2\pi r h + \theta) \quad (1-2)$$

它的图形随着参数的组合不同, 也不一样。如图 1-3 所示, 图 1-3 (a) 中幅度为 2, 频率为 1 Hz, 初相角为 0, 周期为 1 s; 图 1-3 (b) 中初相角为  $\pi/4$ , 周期为 2 s。

存在于正弦波之间的空间和时间关系是很简单的。若将信号在 1 个周期内传播的距离定义为波长  $w$ , 信号的传播速度为  $s$ , 那么易知,  $w = sP$  或  $s = wr$ 。

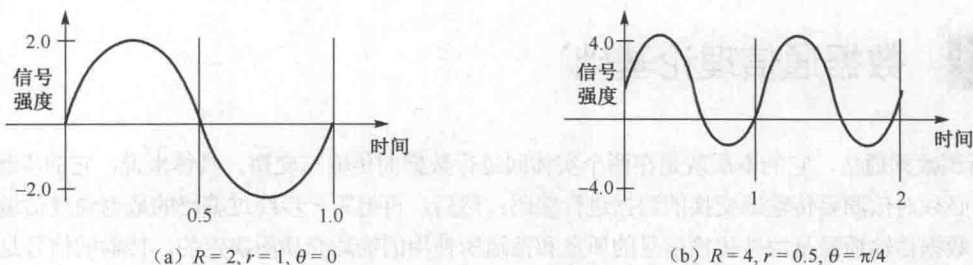


图 1-3  $f(h) = R \sin(2\pi r h + \theta)$

### 1.1.2 频域概念

频率在信号的组成成分中有可能不是唯一的, 例如  $f(h) = \sin(2\pi r_1 h) + \frac{1}{5} \sin[2\pi(5r_1)h]$  就是由  $r_1$  和  $5r_1$  两种频率混合而成的, 且显然后者的频率是前者的 5 倍。上式中的  $r_1$  是合成信号的基本频率, 我们称之为基频。我们可以用时域函数  $f(h)$  来表示信号每一瞬时的强度, 或者用频域函数  $f(r)$  来表示信号的频率组成, 这是因为合成信号的周期与基本频率信号的周期是一样的。另外, 频域函数  $f(r)$  可能是离散的或者是连续的。

信号所包含的频率范围称为频谱, 信号频谱的宽度称为绝对频宽。例如,  $f(h) = \sin(2\pi r_1 h) + \frac{1}{5} \sin[2\pi(5r_1)h]$  的频谱范围为  $r_1 \sim 5r_1$ , 绝对频宽为  $4r_1$ 。有效频带简称为频带, 一般来说, 相对较窄的有效频带的频带范围可以包含绝大部分的信号。

通常情况下, 任意的数字波形均能具有无限的带宽。然而, 传输带宽会受限于物理介质, 同时, 物理介质的成本会随着传输带宽的增加而增加。因此, 信号带宽从经济性和可行性而言, 越近似数字

信息越好。然而,有限带宽可能造成信号的失真,增加接收器处理信号的难度。也就是说,随着频宽限制的增加,接收器产生差错的可能性会随之增加。

信号的数据传输率越高,带宽越宽。同时,系统的传输带宽越大,数据传输速率也就越高。这就是数据传输速率和信道带宽之间的关系。

### 1.1.3 傅里叶分析

一般来说,数据在通信线路上的传输是以电信号的方式进行的。如果把数据以数字信号的方式在通信线路上传输,就会形成电压脉冲序列。电压脉冲序列都是时间的单值函数,为了了解信道所包含的宽带及其对信号的要求,其中的谐波分量可以用傅里叶级数来表示并进行分析。

通常来说,任意周期函数  $z(h)$  都可以用无限个正弦函数和余弦函数之和来表示,即

$$z(h) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} x_k \sin(2\pi k r h) + \sum_{k=1}^{\infty} y_k \cos(2\pi k r h) \quad (1-3)$$

其中  $A_0$  是一个常数,  $r$  为基频,周期  $P=1/r$ ,  $x_k$ ,  $y_k$  分别是  $k$  次正弦和余弦函数的幅值。

假设单个矩形脉冲的幅度为  $R$ , 宽度为  $\mu$ , 如果它关于时间轴对称,通过傅里叶变换可以将时间函数变为频率函数,其关系如下:

$$S(\omega) = R\mu \frac{\sin(\omega\mu/2)}{\omega\mu/2} \quad (1-4)$$

其中  $R$  为振幅,  $\mu$  为脉冲宽度,分析该脉冲频谱可知,当  $\omega = 2\pi/\mu$  时,  $\sin \pi = 0$ ,  $S(\omega) = 0$ , 若近似地把  $S(\omega)$  的第一个零点处的  $\omega = 2\pi/\mu$  (或  $r = 1/\mu$ ) 看成传输宽度为  $\mu$  的矩形脉冲所需要的频带宽度,那么其带宽为

$$B = r = 1/\mu \quad (1-5)$$

综上所述,带宽与脉冲宽度之间存在着反比关系,即数据传输的频率越高,脉冲宽度就越窄,而它所要求的信道带宽也就越高。

### 1.1.4 字符的数据表示方法

下面先简要介绍一些术语,为介绍本节内容作铺垫。

模拟数据是指数据随时间连续变化。例如,在一定时间内摄像机所产生的图像数据和语音数据,传感器所收集的温度数据与压力数据等也是连续的。与此相对,数字数据指的是模拟数据经过量化之后而生成的离散值,例如在计算机中用二进制代码来表示的字符数据和图像数据等。

通信系统传输的主体就是信号。我们可以把信号分为两类:模拟信号和数字信号。数字抗干扰性强、传输信号质量较高,且发送便宜。但它也有占用频带较宽、对模拟数据进行量化时会产生量化误差等缺点。模拟信号的特点是,它的电磁波变化是连续的,并且电磁波在各种媒体中的传输频率不同;数字信号则是一系列连续变化的电压脉冲,我们通常用二进制数“1”表示恒定的正电压,用二进制数“0”表示恒定的负电压。

ASCII 码是由美国标准化协会(ANSI)所制定的一种单字节字符编码方案,它已被国际标准化组织(ISO)和国际电报电话咨询委员会(CCITT)确定为国际标准,简称为 ISO 646 标准。用来表示每个字符的标准 ASCII 码使用的是 7 位二进制数,由于  $2^7 = 128$ ,所以它们总共能表示 128 个字符。传输过程中,为了用来检测代码传送过程中是否发生了错误,可以在 7 位 ASCII 码后再加 1 位奇偶校验

位。字符是计算机中一种常用的数据类型，由于计算机只能以二进制数的形式存储、转发和处理信息，因此必须对二进制数和字符之间的对应关系进行规定，即字符编码，才能使计算机能够处理字符。目前，ASCII 码是国际上广泛使用的编码。1980 年我国颁布 GB—1988—80 国家标准，与标准 ASCII 码唯一不同之处就是用“¥”（人民币标志）替代了“\$”（美元标志）。

### 1.1.5 有限带宽信号

我们可以把信道上传输的信号看成是不同字符编码脉冲的二进制比特流。一般来说，传输信号的信道并不理想，传输信号的各次谐波成分通过的能力也不相同，不同的谐波所对应的相位延迟也不同。信号波形的失真由于信号谐波的振幅被因信道作用导致了不等量的衰减及相位延迟的不同所造成。要保证信号传输的质量，需要使信道的频带适应或高于信号本身的频带。当信道为带宽无限宽的理想信道时，由于各次谐波全部通过，所以波形不会失真。

电话线是用来传送语音信号的，它的带宽通常为  $0 \sim r_p$ ， $r_p$  的取值一般为 3400 Hz。如果使用语音信道并且传输脉冲编码的数据时采用二进制电平，那么码元速率就等于信息速率。假设每个字符有 8 位，而数据传输速率为  $s$ ，那么就需要的  $8/s$  的时间去传送一个字符。谐波频率就等于  $r_1 = 1/P = s/8$ ，是时间值的倒数。所以，语音信道能够通过的最大谐波数为  $r_c/r_1 = 3400/(s/8)$  即  $27200/s$ 。

表 1-1 所示为一次谐波频率和最高次谐波次数与信道数据传输速率之间的关系。从表中可以看出，要使 300~3400 Hz 带宽的电话线接收端能够清晰地辨认传送信号，信道必须允许最高次谐波次数为 10 的谐波通过，而此时，信道的极限数据传输速率为 2400 bps。

表 1-1 信道数据传输速率与谐波数之间的关系

数据传输速率 (bps)	周期 (ms)	一次谐波频率 (Hz)	最高次谐波次数
600	13.33	75	45
1200	6.67	150	22
2400	3.33	300	11
4800	1.67	600	5

### 1.1.6 信道最大数据传输速率

奈奎斯特 (Nyquist) 于 1924 年推导出了非理想有限带宽无噪声信道的最大数据传输速率的表达式。即任意信号，当其通过带宽为  $B$  的低通滤波器时，若信号每秒钟采样  $2B$  次，经过量化、编码后在矩形脉冲编码上传输，根据接收的采样脉冲编码值，接收端就可以完整地重现信号。如果我们把发送的信号电平分为  $L$  级，那么奈奎斯特定理的最高数据传输速率就是：

$$S_b = 2B \log_2 L (\text{bit/s}) \quad (1-6)$$

若带宽已知，根据此定理，便可估算信道的最高数据传输速率。但在实际通信中，数据真正的传输速率是远低于此极限值的。

## 1.2 数据传输的概念及分类

关于数据通信这个方面，我们应该明白数据是怎样从一个设备传输到另一个设备的。

## 1.2.1 单工、半双工和全双工

要将数据从一台设备传输到另一台设备，发送方和接收方必须有明确的方向性。我们可以根据同一时刻数据流向的不同把它分为3种传输模式：单工模式、半双工模式和全双工模式。

### 1) 单工传送

单工模式指的是通信单向进行，实际中的例子有寻呼机，发送方只负责发送数据，而接收方只负责接收数据。

### 2) 半双工传送

半双工传送是这样的一种传输模式，当通信使用的传输线相同时，通信两端的设备都可以发送或接收数据，但是不能同时发送或者接收数据。半双工传送的例子有对讲机等。

### 3) 全双工传送

通信两端的设备可以同时发送和接收数据，这就是全双工模式。全双工模式无须对方向进行切换，对不能有时延的交互式应用十分有利，例如远程监测。

## 1.2.2 异步传输和同步传输

通信双方为完成通信或者服务所必须遵循的规则或约定称为通信协议。计算机通信所采用的协议目的主要是实现计算机与网络的连接。通信协议的组成主要包括语法、语义、定时这3个元素。

① 语法：用户数据与控制信息的格式及其编码。

② 定时：数据序列的详细描述以及通信顺序和通信速率匹配。

在数字信号的传输过程中，我们必须保证接收器的脉冲频率以及数据位时钟写入寄存器相同。所谓同步，就是在接收端使数据位和时钟脉冲在频率和相位保持一致的机制，同步技术就是实现同步的技术。可将其根据同步信号在接收端同步模式的不同分为两类：字符同步（也叫异步传输模式）和位同步（也称同步传输模式）。

### 1) 异步传输模式

异步传输指的是以字符为单位，一个字符一个字符地传输。每个字符由四个部分组成：起始位（1位）、数据位（5~8位）、奇偶校验位（1位）和停止位（1~2位）。字符开始于起始位，结束于停止位，对于字符之间的时间间隔，则没有要求。

发送方和接收方需要在传输开始前，对信息格式和数据传输速率做一个统一的规定，包括字符数据长度、停止位位数、有无校验位以及该校验是奇校验还是偶校验等。

实际通信中，当起始位由高电平变为低电平时便开始传输数据，它是作为通信信号附加进来的。而字符传输的结束则是由停止位表示的。起始位和停止位标志着通信何时开始以及通信何时结束。在数据开始传输后，接收端不断检测传输线是否有起始位到来。起始位的标志是，接收端接收到一系列的“1”（也就是停止位）之后检测到一个下跳沿。数据位、奇偶校验位以及停止位都是在起始位确认后再接收的。处理后将数据位拼接成一个并行字节，并且把停止位删掉，为了确保字符的正确接收，还需检查是否有奇偶校验错误。接收完一个字符后，接收端继续检测传输线，监控“0”电平的到来以及下一个字符的开始，如此循环往复，直至把所有的数据接收完。

从上述数据传输的过程中，我们可以看出，异步传输模式是基于字符的，每传输完一个字符后，为了确保同步，就要用字符的起始位来通知通信双方。这样即使通信双方的时钟频率出现偏差，也不会因偏差的积累导致错位，异步串行通信的可靠性因此会比较高。但它的传输效率较低，因为每个字



符都添加了起始位和停止位等附加位。因此，异步通信一般用于数据传输速率较慢的场合。在高速传输中适用的一般都是同步协议。

## 2) 同步传输方式

同步传输方式与异步通信不同的是，它传输的是字符块（200 个字符），当然，字符块的传输也需要附加同步字符以及数据校验字符等。由于同步传输需要发送设备和接收设备完全保持同步，因此它的硬件复杂度较高。

### (1) 面向比特的同步协议

面向比特的同步协议与面向字符的同步协议不同的是，它可以传输任意位的一帧数据，它依赖的不是特定的字符来标志帧的开始或结束，而是约定的位组合模式。这种协议的一般帧格式如图 1-4 所示。

F	A	C	I	PC	F
开始标志	地址场	控制场	信息场	校验场	结束标志

图 1-4 面向比特同步协议的帧格式

由图 1-4 中可看出，在一般情况下，SDLC/HDLC 的一帧信息包括以下两个场，所有的场都是从最低有效位开始传输数据的。

① SDLC/HDLC 标志场：在 SDLC/HDLC 协议中规定采用 F 标志 01111110 为标志序列。信息的传输的开始和结束都必须以 F 标志。开始标志到结束标志之间构成了一个完整的信息单位——帧。信息都是以帧的形式传输的，每一帧的边界是由标志字符提供的。为了实现帧同步，接收端需要不断地搜寻 F 标志。

② 校验场：帧校验场又称 FC (Frame Check) 场或帧校验序列 FCS (Frame Check Sequence)，它紧跟在信息场之后，为 2 字节。SDLC/HDLC 均采用 16 位循环冗余校验码 CRC (Cyclic Redundancy Code)。所有的信息，除了标志场和为了透明传输而插入的“0”位外，都参与 CRC 计算。

SDLC/HDLC 协议规定的标志字节是 01111110，为了区分信息场中出现的同一种模式字符与标志字节，在连续接收到连续 5 个“1”后，就自动插入一个“0”；除标志字节外，为了恢复信息的原有形式，接收端接收数据时只要遇到 5 个“1”，就自动将其后的一个“0”删除，此过程由硬件自动完成，与面向字符的“数据透明”相比，更容易实现“0”位的插入和删除。

在传输过程中数据出现错误时利用异常结束字符（失效序列）使本帧作废。HDLC 规程中的失效字符为 7 个连续的“1”，而 SDLC 中的失效字符则是 8 个连续的“1”。由于帧中只要存在失效序列就作废，所以在失效序列中无须使用“0”位插入技术。

SDLC/HDLC 协议还规定，一帧内不允许出现数据间隔。在两帧信息之间，发送端连续输出标志字符序列或连续的高电平。两帧信息之间输出的信号就被称为空闲 (Idle) 信号。

### (2) 面向字符的同步协议

以二进制同步通信 (BSC) 协议为例，下面来介绍面向字符的同步协议。BSC 协议最显著的特点就是每次传输时传输的是由若干个字符组成的数据块，而不是仅仅传输一个字符。由于传输的数据块是由字符组成的，因此也被称为面向字符的协议。图 1-5 所示为面向字符的同步协议的帧格式。

SYN	SYT	SOH	标题	STX	数据块	ETB/ETX	块校验
-----	-----	-----	----	-----	-----	---------	-----

图 1-5 面向字符的同步协议的帧格式

由图 1-5 中可明显看出，数据块的前后都有一些特定的字符。每个帧的开头都有一个或两个同步字符 SYN，若在帧的开头添加一个 SYN，则称为单同步，若添加两个 SYN，则称为双同步。设置同步字符的目的是为了方便联络。在数据开始传输后，接收端不断检测传输线是否有同步字符，一旦出



现同步字符标志着此帧开始。标题后面是文始字符 STX，它表示标题信息的结束以及传输报文开始。报文后面是文终字符 ETX，它表示报文文本结束。最后是校验码 BCC，它对从 SOH 到 ETX 之间的字段进行校验，校验方式有多种可能，可以是水平校验和垂直奇偶校验也可以是 CRC 校验。

与异步起止协议不同，面向字符的协议无须在每个字符前后附加起始位和停止位，因此大大提高了它的传输效率。若报文中出现与特定字符代码一样的数据字符，它到底是数据字符代码还是特定字符代码就无法被识别了。因此，协议应能够将特定字符作为普通数据处理，即应具有“数据透明”能力。为解决以上问题，该协议建立了转义字符 DLE (Data Link Escape)。在一个特定字符前面加一个 DLE 就能够把它看成是数据。作为一个特定的字符的 DLE，若把它看成是数据，也需要在前面加一个 DLE，这种方法被称为字符填充。由于字符填充实现起来比较麻烦而且依赖于字符的代码，因此一个新的面向比特的同步协议被提出了。

### 1.2.3 串行传输和并行传输

#### 1) 串行传输

串行传输指的是只使用一条线路逐个传输比特。串行传输与并行传输相比，优点是价格相对比较便宜，在远距离传输的时候的可靠性也较高，缺点是速度相对较慢。例如计算机网络中常使用串行传输。

#### 2) 并行传输

并行传输指的是可以在同一时刻发送多个有专用传输信道的比特。它的数据传输速率相对较高，且适用于近距离传输。它并不适合远距离传输是由于远距离传输时线路费用高，当比特到达数据处理端的时间不一致时接收端不方便同步。在实际中，计算机中的 CPU 和内存之间、计算机和外部设备之间的通信都属于并行传输。

## 1.3 交换技术

一般来说，通信网采用的是点到点的信道，数据传输到达目的地可能需要经过一系列的交换节点，这就是数据交换技术。传统的数据交换技术一般包括三种：电路交换、报文交换和分组交换。

#### 1) 报文交换

报文交换与电路交换不同，它无须事先建立物理线路。需要发送的数据被发送方交给中间交换节点，中间交换节点将此报文存储起来并检查其正确性和完整性，再把它转发至下一个中间交换节点，这样循环下去，直至数据被发送至接收方。

#### 2) 电路交换

电路交换指的是在发送方和接收方之间创建一条临时的物理连接，像电话交换系统那样。必须先是在发送方和接收方之间建立一条实际的物理线路才能进行数据传输，当数据传输结束后，将物理线路拆除。

电路交换可以不受其他用户干扰，独享物理线路、传输时延较低，但是建立一条物理线路则需要较长的时间。在大量的数据传输时，电路交换很适用，但数据量较少时，传输效率则较低。

#### 3) 分组交换

分组交换是对报文交换的改进，它又被称为包交换。分组交换把较长的报文分成较短的数据单元，并给这些数据单元加上控制信息，形成一个个大小从一千到几千比特不等的分组。由于人们完全可以将很小的分组存放在中间节点的内存中而不是外部磁盘上，因此分组交换的数据传输时延与报文交换相比大大降低。分组交换包括两种类型：数据报和虚拟电路。

### (1) 数据报

数据报方法中的分组称为数据报，每个分组需要按照一定的格式添加一些信息，如源地址、目的地址、分组编号等。网络中每个数据报的传播路径是由网络随机决定的，网络不能保证数据报不会丢失，也不能保证数据报顺序到达接收端，而只是尽力地将数据报交付给接收端。因此，在传输层，也就是网络层的上层，需要对数据报进行重新排序。

数据报方式的优点是传输时延小、传输过程中即使有节点出现故障也不会影响其后续分组的传输，所以一般用于传输较短的报文。但由于每个分组都添加了一些信息，因此增加了需要传输的信息长度及其处理时间。

### (2) 虚电路

与电路交换类似，在数据传输前需要在发送端和接收端之间建立一个逻辑连接。在传输开始时发送端发出请求建立连接的消息，并将其通过寻找到的合适的路由发送出去，若接收端同意建立连接就给发送端肯定的响应，之后就可以传输数据了。虚电路与电路交换不同的是，它具有复用的优点，即一条链路可以同时为多对设备提供通信服务，这是因为逻辑连接建立后，其他通信也能够用此逻辑去连接。

虚电路可以是暂时性的或者永久性的。使用暂时性的虚电路需要连接建立和连接拆除过程；而永久性虚电路无须连接建立和连接拆除过程，因为它的虚电路总是建好的，它是专门给特定用户使用的。

## 1.4 信息及度量

传输含有一定量信息的消息是通信的目的。信息量指的是信息的不确定性程度。事件发生的概率越小，它所包含的信息量就越大，信息量的大小与事件发生的概率是密切相关的。极端情况下，当事件为必然事件时，即此事件发生的概率为 1，那么它所包含的信息量就为 0；当事件发生的概率趋于零时，它所包含的信息量就趋于无穷。

我们可以用事件发生概率的对数的负值来度量事件所含的信息量。信息论中，事件包含的信息量  $N$  与事件发生的概率  $C$  之间的关系用  $N = -\log(C)$  来表示。对数的底取决于信息量的单位。若对数底为 2，则信息量的单位为比特 (bit)，简称 b；若对数的底为自然对数  $e$ ，则信息量的单位为奈特 (nat)；若对数的底为 10，则信息量的单位为哈脱来 (Haitely)。

信息论中有一个重要的结论：任何形式的待传信息都可以被表示为二进制数的形式而不失主要内容。由抽样定理可知，当一个频带受限的连续信号进行采样时，可以用一定数量的离散抽样值代替，而离散的抽样值则可用于二进制脉冲序列来表示。因此虽然我们之前讨论的都是离散消息，但是在连续信息下，此信息量的定义依旧成立。

信源的平均信息量指的是在由多个消息组成的字符串中，每个消息所含信息量的统计平均值。由各消息信息量的概率加权求和可得信源的平均信息量。例如，一个信源由  $E$ 、 $F$  两种符号组成， $E$  出现的概率为  $C(E)$ ， $F$  出现的概率为  $C(F)$ ，则信源的平均信息量为

$$N = -[C(E)\log_2 C(E) + C(F)\log_2 C(F)] \quad (1-7)$$

假设离散信源由  $k$  个符号  $l_1, l_2, \dots, l_k$  组成，每个符号  $l_i$  出现的概率为  $C(l_i)$ ，则此信源的平均信息量为

$$N(l) = -\sum_{i=1}^k C(l_i)\log C(l_i) \quad (1-8)$$

由于此式与统计热力学中的熵的表示形式一样，因此往往我们又称  $N(l)$  为信源的熵 (Entropy)。

# 信 道

## 2.1 引言

信道是一种将信号从发送端传输到接收端的通信设备。我们知道，通信方是分散的，这是由通信固有的分布特征决定的，因此，通信方之间的信息交换必须经过允许光电信号通过的通道。

信道特性包括信道带宽、信道容量、信道衰落、信道延迟和信道噪声等，它们决定了数据通信的质量。信息的传送方式是由信道的特性直接决定的，因此在通信系统中研究信道是很有必要的。

### 2.1.1 信道容量

信息是通过信道来传输的，信息的传播速度是由信道的容量决定的。信道容量通常用符号  $V$  来表示，单位是比特/秒 (bit/s) 或者比特/符号，指的是单位时间内无差错传输的最大信息率，它表示的是每秒或每个信道符号能传输的最大信息量。

一般来说，不同信道的信道容量是不同的。本节所提到的信道，除特殊说明外，指的都是带宽有限、平均功率有限的高斯白噪声连续信道。香农定理给出了在具有一定频带宽度的信道上，理论上单位时间内可能传输的信息量的极限值。香农认为，受到高斯白噪声干扰的连续信道的信道容量为

$$V = T \log_2(1 + G/S) = T \log_2(1 + G/s_0 T) \text{ (bit/s)} \quad (2-1)$$

式中  $T$  为信道带宽，单位是 Hz， $G$  为信号功率，单位是 W， $s_0$  为噪声单边功率谱密度，单位是 W/Hz， $S = s_0 T$  为噪声功率，单位也是 W；式 (2-1) 就是著名的香农公式。由此公式可以得到如下结论：

① 信道容量  $V$  随着信道带宽  $T$  的增加而增加，但是这个增加不可能无限，它是有限制的。由于噪声功率  $S$  与信道带宽  $T$  成正比，因此噪声功率  $S$  会随着信道带宽  $T$  的增加而增加；当信道带宽  $T \rightarrow \infty$  时，信噪比  $\frac{G}{S} \rightarrow 0$ ，因此信道容量是不可能无限增加的。当信道带宽  $T \rightarrow \infty$  时，信道的极限容量  $V$  大约为  $1.44G/s_0$ 。

② 信道容量  $V$  一定的情况下，可以将信道带宽  $T$  与信噪比  $G/S$  进行互换。换一种说法，当信道容量要求一定时，不同信道环境下的通信可以利用不同的方法来实现。当通信频带资源比较丰富时，可以采用扩频通信的方式来增加信道带宽  $T$ ，降低信噪比  $G/S$ ，即用较大的带宽来换取较小的信噪比。卫星通信采用的就是扩频通信，但是由于当信道带宽  $T \rightarrow \infty$  时，信道容量  $V$  不是无限而是有限的，因此扩频通信的影响是很有限的。当通信带宽资源比较紧缺时，可以用较大的信噪比来换取较小的信道带宽，即提高信号发送功率以降低对信道带宽的要求。目前，带宽资源随着无线通信的日益发展而