



工业和信息化普通高等教育“十三五”规划教材立项项目

21世纪高等教育计算机规划教材



# 计算机网络技术 与应用教程（第2版）

Computer Network Technology  
and Application

张基温 张展赫 编著

从实用性出发而又不忽视基本理论

强调基础而又贴近主流网络技术

内容经典而又紧跟技术发展的步伐



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化普通高等教育“十三五”规划教材立项项目  
21世纪高等教育计算机规划教材

# 计算[ ]技术与应用教程 (第2版)

Computer Network Technology  
and Application

■ 张基温 张展赫 编著



人民邮电出版社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机网络技术与应用教程 / 张基温, 张展赫编著

— 2版. — 北京: 人民邮电出版社, 2016. 6

21世纪高等教育计算机规划教材

ISBN 978-7-115-42324-5

I. ①计… II. ①张… ②张… 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(2016)第085717号

## 内 容 提 要

本书是为应用型本科院校“计算机网络”课程而编写的教材, 书中贯穿了“以协议为核心, 以应用为目的”的思想, 采用了既有理论讲解又有实践跟进的全新编写体系。全书共分7章, 主要内容: 计算机网络概述、数据通信基础、TCP/IP 与网络互连、Internet 应用、IEEE 802 组网技术、Internet 接入技术、网络安全等。

本书从实用性出发而又不忽视基本理论, 强调基础而又贴近主流网络技术, 内容经典而又紧跟技术发展的步伐。为方便学习, 书中配有大量的操作插图, 每章都配有一定量的经典实验和习题。

本书可作为高等院校信息类专业的“计算机网络”课程教材, 也可作为高等院校非网络专业的本科教材或各类计算机培训班的教材。

---

◆ 编 著 张基温 张展赫

责任编辑 张孟玮

责任印制 沈 蓉 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 14.5

2016年6月第2版

字数: 380千字

2016年6月北京第1次印刷

---

定价: 38.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

## 第2版前言

计算机网络的蓬勃发展,使我们处在一个信息时代,一个网络时代。不分专业,不分职业,不分老少,不分民族,不分国籍,不分地域,处处、时时、刻刻,都有人工作在网络中,学习于网络中,交易于网络中,交流于网络中。计算机网络神奇而又普通,虚拟而又实在,强烈地激发着亿万人想要了解它的奥秘。在学校中,也被越来越多的专业列为学习的内容。

但是,学习计算机网络却不是一件容易的事情。从学科方面看,它涉及数学、物理、机械、电气、信息、管理;从教学形式上看,它涉及理论、实验研究、工程实践;从内容上看,它还在不断发展、推陈出新且变幻莫测,以至于当我们询问已经学过这门课的同学有何感想时,多数人的回答是“一大堆概念”,还有相当部分的人感到茫然。

“计算机网络”课程确实难教,教材也确实难写。不过,这些难度也给了编者一些改革的冲动:从实用性出发而又不忽视基本理论,强调基础而又贴近主流网络技术,内容经典而又紧跟知识变化的步伐,面对知识的很强离散性需能使学习者便于梳理。几十年来,作者虽然推出过不同结构、面向不同对象的网络教材,但都觉得不太理想,那些冲动,也就尚未平息。

这本教材的第1版于2013年问世。出版之后,社会反响尚可,应人民邮电出版社张孟玮编辑之邀,在原来的基础上按照“协议为核心,贴近实际应用”的思路进行了修订,目的在于让学习者抓牢“协议”这根网络的“神经”,学以致用,提高学习兴趣。

这次修订由张基温教授负责,张展赫参加了部分写作,张秋菊、赵忠孝、史林娟、张展为、董兆军、张友明、陈觉、戴璐分别负责制图、校对。此外,在本书的写作过程中,参考了不少其他作品,已经在参考文献中加以说明;还有一些是网上的佚名作者,这部分资料无法在参考文献中说明。在本书出版之际谨向这些为本书出版做出贡献者致以衷心谢意。

本书作为一种新体系的作品,不足之处在所难免,还请各位读者多多批评并不吝赐教。

编者

2016年1月

## 第 1 章 计算机网络概述.....1

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1.1 计算机网络的概念 .....               | 1  |
| 1.1.1 计算机网络及其功能 .....            | 1  |
| 1.1.2 计算机网络评价指标 .....            | 2  |
| 1.2 计算机网络分类 .....                | 5  |
| 1.2.1 按照地理覆盖范围分类 .....           | 6  |
| 1.2.2 按网络拓扑结构分类 .....            | 6  |
| 1.3 ISO/OSI-RM 体系结构 .....        | 8  |
| 1.3.1 OSI/RM 概述 .....            | 8  |
| 1.3.2 OSI/RM 各层的功能 .....         | 9  |
| 1.3.3 OSI/RM 中数据的封装与拆封装 .....    | 10 |
| 1.3.4 实体、协议、服务和访问点 .....         | 11 |
| 1.3.5 OSI/RM 中的三级抽象 .....        | 12 |
| 1.4 基于网络互连的 TCP/IP 网络体系结构 .....  | 12 |
| 1.4.1 APRANet 与 TCP/IP .....     | 12 |
| 1.4.2 分组交换 .....                 | 14 |
| 1.4.3 虚电路与数据报 .....              | 16 |
| 1.4.4 TCP/IP 体系结构 .....          | 18 |
| 1.5 IEEE 802 体系结构 .....          | 18 |
| 1.5.1 IEEE 802 模型 .....          | 19 |
| 1.5.2 IEEE 802 标准 .....          | 19 |
| 1.6 基于 TCP/IP+以太网的流行网络体系结构 ..... | 20 |
| 习题 1 .....                       | 21 |

## 第 2 章 数据通信基础.....23

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.1 传输介质 .....          | 23 |
| 2.1.1 有线传输介质 .....      | 24 |
| 实训 1 RJ-45 网线制作 .....   | 26 |
| 2.1.2 无线传输介质 .....      | 30 |
| 实训 2 光纤冷接头制作 .....      | 32 |
| 2.2 信道与信号技术 .....       | 37 |
| 2.2.1 信道的概念 .....       | 37 |
| 2.2.2 数据信号及其调制/解调 ..... | 38 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 2.2.3 数字信号的数字编码 .....        | 41 |
| 2.2.4 串行通信与并行通信 .....        | 42 |
| 2.2.5 单工、半双工和全双工通信 .....     | 43 |
| 2.2.6 多路复用技术 .....           | 43 |
| 2.3 数据传输控制技术 .....           | 46 |
| 2.3.1 数据传输的同步控制 .....        | 46 |
| 2.3.2 数据传输的差错检测 .....        | 47 |
| 2.3.3 差错控制协议 .....           | 50 |
| 2.3.4 数据传输的流量控制与滑动窗口协议 ..... | 51 |
| 2.4 计算机网络通信控制设备 .....        | 53 |
| 2.4.1 网络适配器 .....            | 53 |
| 实训 3 安装网卡 .....              | 54 |
| 2.4.2 中继器与集线器 .....          | 55 |
| 实训 4 用 Hub 组建对等网 .....       | 56 |
| 2.4.3 交换机 .....              | 57 |
| 实训 5 交换机的基本配置 .....          | 59 |
| 2.4.4 路由器 .....              | 61 |
| 习题 2 .....                   | 65 |

## 第 3 章 TCP/IP 与网络互连.....68

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.1 TCP/UDP .....                  | 68 |
| 3.1.1 协议端口 .....                   | 68 |
| 3.1.2 TCP 的特征 .....                | 69 |
| 3.1.3 TCP 的基本工作过程 .....            | 70 |
| 3.1.4 TCP 报文格式 .....               | 73 |
| 3.1.5 UDP .....                    | 75 |
| 实训 6 使用 TCP/UDP 吞吐量测试工具 TTCP ..... | 75 |
| 3.2 IP 协议 .....                    | 77 |
| 3.2.1 IPv4 地址 .....                | 77 |
| 3.2.2 子网划分与子网掩码 .....              | 78 |
| 3.2.3 IPv4 分组格式 .....              | 79 |
| 3.2.4 IPv6 .....                   | 81 |
| 3.3 ICMP 协议 .....                  | 83 |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 3.3.1 ICMP 提供的服务 .....            | 83        |
| 3.3.2 ICMP 应用举例 .....             | 83        |
| 实训 7 利用 ping 命令测试网络的<br>连通性 ..... | 84        |
| 3.4 路由协议与路由器配置 .....              | 85        |
| 3.4.1 自治系统与路由协议分类 .....           | 85        |
| 3.4.2 路由算法举例 .....                | 86        |
| 3.4.3 路由器配置 .....                 | 87        |
| 实训 8 路由器的端口配置 .....               | 89        |
| 实训 9 静态路由配置 .....                 | 90        |
| 实训 10 动态路由配置 .....                | 91        |
| 习题 3 .....                        | 92        |
| <b>第 4 章 Internet 应用 .....</b>    | <b>94</b> |
| 4.1 TCP/IP 网络中的应用层 .....          | 94        |
| 4.1.1 客户机/服务器模式与对等模式 .....        | 94        |
| 4.1.2 应用层协议 .....                 | 95        |
| 4.2 域名服务系统 .....                  | 96        |
| 4.2.1 域名空间 .....                  | 96        |
| 4.2.2 域名规则 .....                  | 97        |
| 4.2.3 域名解析 .....                  | 98        |
| 实训 11 DNS 服务器配置 .....             | 99        |
| 4.3 文件传输协议 .....                  | 105       |
| 4.3.1 FTP 模型 .....                | 106       |
| 4.3.2 FTP 文件传输过程 .....            | 106       |
| 实训 12 FTP 服务器配置 .....             | 108       |
| 4.4 超文本传输 .....                   | 109       |
| 4.4.1 超文本与 Web .....              | 109       |
| 4.4.2 B/S 计算模式与浏览器结构 .....        | 110       |
| 4.4.3 HTTP 的工作机制 .....            | 112       |
| 实训 13 Web 服务器配置 .....             | 113       |
| 4.5 电子邮件 .....                    | 116       |
| 4.5.1 电子邮件系统的基本原理 .....           | 116       |
| 4.5.2 简单邮件传输协议 .....              | 117       |
| 4.5.3 其他几个重要的电子邮件协议 .....         | 117       |
| 4.6 网络交流平台 .....                  | 119       |
| 4.6.1 即时通信软件 .....                | 119       |
| 4.6.2 最新的网络交流工具 .....             | 120       |
| 习题 4 .....                        | 121       |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>第 5 章 IEEE 802 组网技术 .....</b>   | <b>123</b> |
| 5.1 以太网技术 .....                    | 123        |
| 5.1.1 以太网的发展 .....                 | 123        |
| 5.1.2 共享以太网中的 CSMA/CD 协议 .....     | 125        |
| 5.1.3 IEEE 802.3 以太网帧格式 .....      | 126        |
| 5.1.4 以太网体系结构 .....                | 127        |
| 5.1.5 基于交换的园区网三层架构 .....           | 128        |
| 实训 14 交换以太网的端口汇聚配置 .....           | 129        |
| 5.2 虚拟局域网 .....                    | 130        |
| 5.2.1 虚拟局域网概述 .....                | 130        |
| 5.2.2 VLAN 的划分方法 .....             | 131        |
| 实训 15 在同一个交换机上创建 VLAN .....        | 132        |
| 5.3 无线局域网 .....                    | 133        |
| 5.3.1 WLAN 的传输介质 .....             | 133        |
| 5.3.2 无线局域网的结构 .....               | 134        |
| 5.3.3 IEEE 802.11 协议 .....         | 135        |
| 5.3.4 蓝牙技术 .....                   | 137        |
| 5.3.5 Wi-Fi .....                  | 139        |
| 实训 16 在 Windows 下建立无线<br>局域网 ..... | 141        |
| 习题 5 .....                         | 144        |
| <b>第 6 章 Internet 接入技术 .....</b>   | <b>146</b> |
| 6.1 Internet 接入概述 .....            | 146        |
| 6.1.1 ISP .....                    | 146        |
| 6.1.2 接入需求与接入类型 .....              | 147        |
| 6.1.3 IP 地址解析 .....                | 149        |
| 6.1.4 PPP 协议 .....                 | 151        |
| 6.2 铜线接入 .....                     | 152        |
| 6.2.1 综合业务数字网 .....                | 152        |
| 6.2.2 非对称数字线路 .....                | 154        |
| 6.3 光纤接入 .....                     | 156        |
| 6.3.1 光纤接入网概述 .....                | 156        |
| 6.3.2 光纤到户及其应用 .....               | 157        |
| 6.4 光纤/铜线混合接入网 .....               | 158        |
| 6.4.1 HFC 系统结构 .....               | 158        |
| 6.4.2 HFC 的频谱结构和传输模式 .....         | 158        |
| 6.4.3 Cable Modem 模式 .....         | 159        |
| 6.5 无线接入 .....                     | 161        |

|                               |            |                               |            |
|-------------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| 6.5.1 无线接入概述 .....            | 161        | 7.3.4 基于密钥的认证 .....           | 192        |
| 6.5.2 卫星通信 .....              | 163        | 7.4 安全协议 .....                | 192        |
| 6.6 新一代接入技术: BPL 和 VLC .....  | 164        | 7.4.1 SSH .....               | 192        |
| 6.6.1 BPL 接入 .....            | 164        | 7.4.2 安全套接层协议 .....           | 192        |
| 6.6.2 VLC 接入 .....            | 166        | 7.4.3 IPSec 与虚拟专用网 .....      | 194        |
| 实训 17 用光 Modem + 无线路由接入 ..... | 169        | 实训 20 实现一个 VPN 连接 .....       | 194        |
| 习题 6 .....                    | 179        | 7.5 网络资源访问控制 .....            | 195        |
| <b>第 7 章 网络安全</b> .....       | <b>181</b> | 7.5.1 访问控制的二元关系描述 .....       | 195        |
| 7.1 网络入侵 .....                | 181        | 7.5.2 自主访问控制与强制访问控制 .....     | 198        |
| 7.1.1 恶意程序入侵 .....            | 181        | 实训 21 用户账户管理与访问权限<br>设置 ..... | 200        |
| 7.1.2 黑客入侵 .....              | 183        | 7.6 网络隔离技术 .....              | 203        |
| 7.1.3 安全意识及防护 .....           | 184        | 7.6.1 数据包过滤 .....             | 203        |
| 7.2 数据加密与签名 .....             | 185        | 7.6.2 网络地址转换 .....            | 206        |
| 7.2.1 加密/解密算法和密钥 .....        | 185        | 7.6.3 代理技术 .....              | 206        |
| 7.2.2 对称密钥体系 .....            | 185        | 7.6.4 网络防火墙 .....             | 209        |
| 7.2.3 非对称密钥体系 .....           | 186        | 7.6.5 网络的物理隔离 .....           | 212        |
| 7.2.4 数字签名 .....              | 186        | 7.7 网络安全威慑技术 .....            | 214        |
| 实训 18 加密软件 PGP 的使用 .....      | 187        | 7.7.1 安全审计 .....              | 215        |
| 7.2.5 数字证书与 PKI .....         | 188        | 7.7.2 入侵检测 .....              | 216        |
| 实训 19 证书制作及 CA 系统配置 .....     | 190        | 7.7.3 网络诱骗 .....              | 219        |
| 7.3 身份识别技术 .....              | 190        | 7.8 信息网络安全法律与法规 .....         | 221        |
| 7.3.1 用户识别号与口令攻击 .....        | 190        | 习题 7 .....                    | 223        |
| 7.3.2 认证卡与电子钥匙 .....          | 191        | <b>参考文献</b> .....             | <b>225</b> |
| 7.3.3 生物识别技术 .....            | 191        |                               |            |

# 第 1 章

## 计算机网络概述

计算机网络是计算机技术和通信技术密切结合的产物，它代表了当代计算机体系结构发展的一个极其重要的方向。尤其是进入 21 世纪以来，人类的很多活动都必须依靠网络。

### 1.1 计算机网络的概念

#### 1.1.1 计算机网络及其功能

多年来，计算机网络一直没有统一的严格意义上的定义，而且随着计算机技术和通信技术的发展，其内涵也在不断地发展变化。从广义的角度讲，计算机网络是计算机技术与通信技术相结合，以实现信息传送和资源共享为目的的系统的集合。美国信息处理学会联合会认为，计算机网络是以能够相互共享资源（硬件、软件、数据）的方式连接起来，并各自具备独立功能的计算机系统的集合。

本书给出如下定义：计算机网络是将处于不同地理位置且相互独立的计算机或设备（如打印机、传真机等），在网络协议和网络操作系统的控制下，利用传输介质和通信设备连接起来，以实现信息传递和资源共享为主要目的的系统的集合。图 1.1 所示为计算机网络构成图。

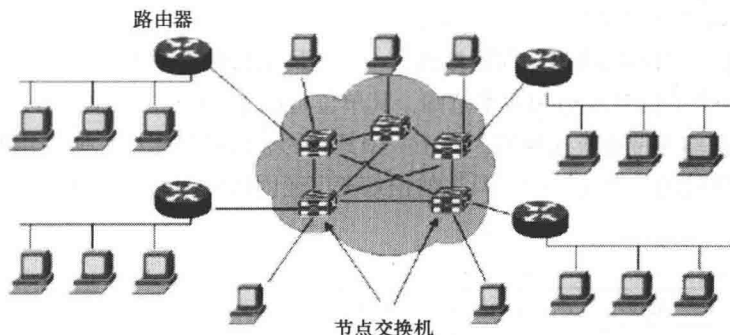


图 1.1 计算机网络

现今，人们非常迷恋计算机网络，那到底计算机网络给人们带来了哪些好处？换句话说，计算机网络主要为用户提供了哪些功能呢？下面将一一进行介绍。

#### 1. 数据传输

这里的数据指的是数字、文字、声音、图像、视频信号等媒体所存储信息的计算机表示。在

计算机世界里，一切事物都可以用 0 和 1 这两个数字表示出来。计算机网络使得各种媒体信息通过一条通信线路从甲地传送到乙地。数据传输是计算机网络各种功能的基础，有了数据传输，才会有资源共享，才会有其他各种功能。

## 2. 资源共享

资源包括硬件、软件和数据。硬件指各种处理器、存储设备、输入/输出设备等，可以通过计算机网络实现这些硬件的共享，如打印机、硬盘空间等。软件包括操作系统、应用软件、驱动程序等，可以通过计算机网络实现这些软件的共享，如多用户的网络操作系统、应用程序服务器。数据包括用户文件、配置文件、数据文件、数据库等，可以通过计算机网络实现这些数据的共享，如通过网上邻居复制文件和网络数据库。通过共享能使资源发挥最大的作用，同时还能节省成本，提高效率。

## 3. 负载均衡

在有很多台计算机的环境中，这些计算机需要处理的业务可能不同，经常出现忙或闲现象。有了计算机网络，可以通过网络调度来协调工作，把“忙”的计算机上的部分工作交给“闲”的计算机去做，还可以把庞大的科学计算或复杂信息处理问题交给几台连网的计算机，由它们协调配合来完成。分布式信息处理、分布式数据库等就是利用计算机网络来实现负载均衡最好的例子。

## 4. 网络服务

现在，电子邮件、网上电话、网络会议、电子商务、电子政务等都是计算机网络的产物，它们给人们的生活、学习和娱乐带来极大的方便。有了计算机网络，实时控制系统才有了保障，道路交通设施等才能在无人值守的情况下准确无误地运作。伴随着计算机网络新技术的不断出现，人们的生活、工作和学习会越来越方便。

# 1.1.2 计算机网络评价指标

评价一个计算机网络有很多方面，有技术的、有性能的，也有经济的、服务的。这里仅介绍几个主要指标。

## 1. 带宽（Bandwidth）和信道容量

关于带宽的概念，在模拟系统和数字系统中有所不同。

### 1) 模拟通信系统中的带宽

早期电子通信采用模拟技术。在模拟通信中，不同的传输介质允许的电磁波频率分为不同。图 1.2 给出了各种介质的基本适用频率范围，其单位是赫兹（Hz）、千赫（kHz）和兆赫（MHz）等。这个频率范围称为带宽或通频带。对于一个具体的通信系统来说，所采用的技术不同，在所用介质的频带中所处的位置也不同。具体的信道宽度还因所采用的传输技术而异。

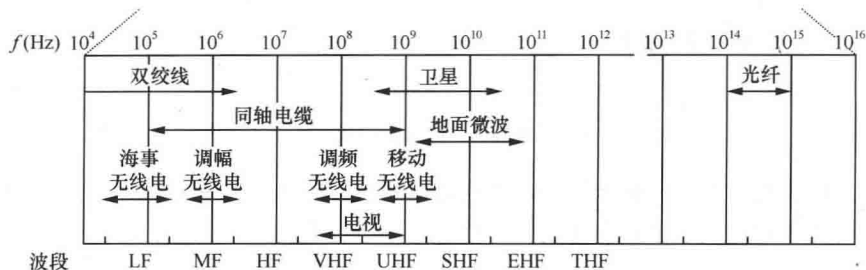


图 1.2 不同传输介质的频率范围

一般说来,一种模拟信号中往往包含了不同频率的分量,其最高频率与最低频率之间的宽度就是信号带宽。若信号带宽超过信道带宽,就会形成信号失真。图 1.3 所示为一张声波频谱分析图。可以看出,其频带很宽。因此,不可能做到一点也不失真。但是,可以看出,声波信号的主要能量集中在低频部分。因此,只要信道能保证低频部分不失真,也就做到了基本不失真。我们把这样的传输称为基带传输,基带传输的信号称为基带信号(Baseband Signal)。

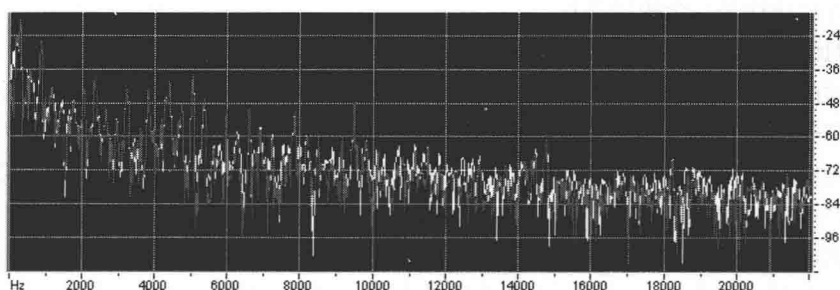


图 1.3 声波频谱分析图

尽管基带传输可以保证信号基本能通过,但人们并不会放弃进一步提高传输质量的努力,并沿着两个技术方向前进:一个技术方向是采用调制技术,将信号变换(调制)为适合在信道中传输的频带范围进行传输,这种信号称为频带信号(通带信号),这种技术称为调制/解调。简单地说,调制就是把不能传输的信号变为能传输的信号,解调就是把调制后的信号复原;另一个技术方向是提高高频传输的能力,扩大带宽。通常把比音频带宽更宽的频带(一般大于 2.5Gbit/s)称为宽带(Broadband)。在宽带系统中,借助频带传输,可以将链路容量分解成两个或多个信道。如图 1.4 所示,ADSL 由 3 个信息通道组成:POTS(话音)通道(4 kHz)、上行通道(10 kHz~50 kHz)和下行通道(1 MHz 以上)。

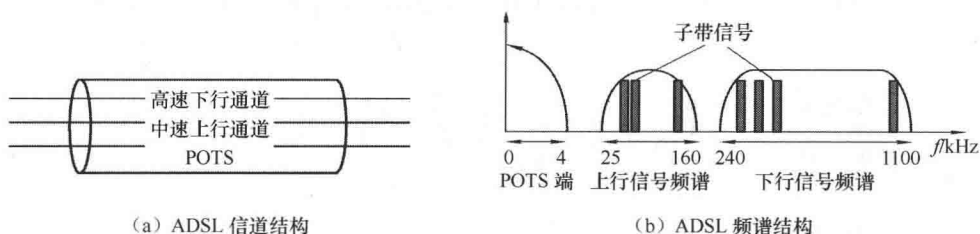


图 1.4 ADSL 上的 3 个信息通道

## 2) 数字传输通信系统中的带宽——信道容量

在数字通信系统中,带宽是指在单位时间内网络中能够通过的“最大数据量”,并用比特率——单位时间内所能传递的二进制代码的有效位(bit)数衡量,单位为 bit/s、kbit/s、Mbit/s、Gbit/s、Tbit/s 等。这里,量词 k、M、G 和 T 的含义采用通信领域中的约定。这些量词在通信领域和计算机领域中的含义的区别如表 1.1 所示。

表 1.1 常用量词在计算机领域与通信领域的含义

| 使用领域  | k/K (千)                  | M (兆)                      | G (吉)                          | T (太)            | 应用举例       |
|-------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------|------------|
| 通信领域  | 1k=10 <sup>3</sup>       | 10 <sup>6</sup>            | 10 <sup>9</sup>                | 10 <sup>12</sup> | 带宽         |
| 计算机领域 | 1K=2 <sup>10</sup> =1024 | 2 <sup>20</sup> =1 048 576 | 2 <sup>30</sup> =1 073 741 824 | 2 <sup>40</sup>  | 存储容量、信息量大小 |

比特率又叫数据传输速率。一条物理信道上能够传输数据的最高速率，表现了信道进行数据传输的最大能力，称为信道容量，也称为带宽，这是因为数据传输率与时钟频率成正比，故时钟频率越高，比特率就越高，网络中数据的传输速率就越高。

信道容量是信道所能传输数据的理论值。在实际应用中，网络的实际传输速率往往达不到信道容量，如 56kbit/s 的调制解调器在一般的线路上的实际传输速率只能达到 33.6kbit/s 甚至更小。因此，信道容量往往是一个极限参数。

## 2. 信噪比与误码率

从物理学的角度看，噪声是发声体做无规则振动时发出的声音，是干扰信号传输的能量场。任何非理想信道都会有噪声。这种能量场的产生源大致分为两类：热噪声和冲击噪声。

(1) 热噪声是内部噪声，由介质中电子热运动等原因引起，随机产生，强度与频率无关，频谱很宽，会产生随机差错。

(2) 冲击噪声是外部噪声，由外界干扰引起，其幅值较大，会产生突发性差错。

噪声强弱用信号的平均功率与噪声的平均功率之比表示，称为信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）。信噪比高，说明噪声在信号中占的比例小。

如图 1.5 所示，在数字传输系统中，噪声叠加在信号上，会引起某些位的信号在接收端错误地被接收，称为误码。引起误码的另一个因素就是信道带宽所引起的信号失真。传输系统的带宽低，信号的失真就严重，信噪比就低，误码率就高。因此，在数字传输系统中用误码率来评价信道的传输质量。

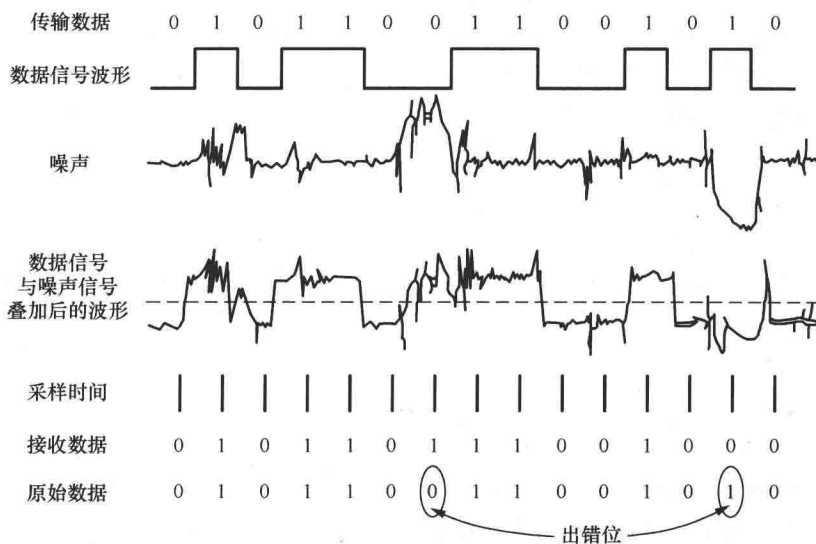


图 1.5 噪声引起的误码

误码率是数据通信系统在正常工作情况下的传输可靠性指标，指信道传输信号的出错率，用下面的公式表示：

$$P_e = \frac{N_e}{N}$$

式中， $N$  为数据传输的总位数， $N_e$  为数据传输过程中出错的位数。通常计算机网络要求误码率低于  $10^{-6}$ ，即每传送 1 兆位数据，不能出现多于 1 个错误。

### 3. 时延

时延 (Delay) 是指数据由信源传到信宿过程中所耗费的时间, 其单位是秒 (s)、毫秒 (ms)、微秒 ( $\mu\text{s}$ ) 等。数据在通信时, 一般要经过 3 个过程: 处理 (主要指数据在缓冲区中排队等待)、发送 (将要传送数据从计算机送到传输介质上) 和传播。这 3 个过程都需要一定的时间, 形成通信中的时延。图 1.6 所示为 3 种时延产生的示意图。

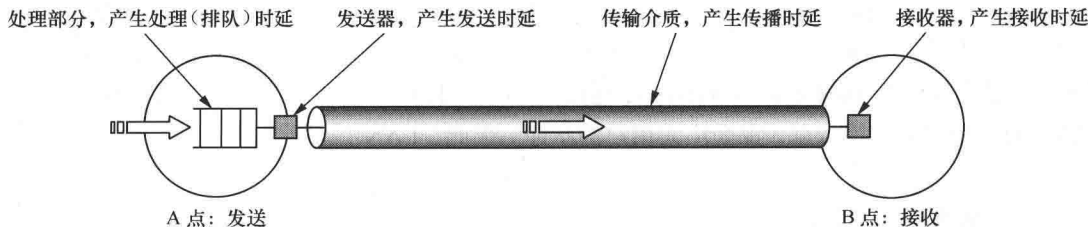


图 1.6 通信中时延的产生

可以看出:

$$\text{传输总时延} = \text{处理时延} + \text{发送时延} + \text{传播时延} + \text{接收时延}$$

通常发送时延、接收时延和处理时延要占有很大比重, 所以并非传播时延低的信道, 带宽就一定高。例如, 光波在光纤中的传播速率为  $205\text{Mbit/s}$ , 而电磁波在 5 类铜线中的传播速率为  $321\text{Mbit/s}$ 。但是, 为什么常说“光纤的数据传输率比铜线高”呢? 原因就是数据在光纤信道上的发送速率高。下面进一步分析发送时延与传播时延之间的关系。假如只传输 1 个字节的数据, 用光纤传输  $100\text{km}$  的距离, 则传播时延为  $100 \times 10^3 / (2.0 \times 10^5) = 0.5\text{s}$ 。若在带宽为  $1\text{Mbit/s}$  的链路中传输, 发送时延为  $8 \times 10^{-6}\text{s}$ , 不考虑排队处理时延, 传输总时延为  $0.500008\text{s}$ ; 若在  $100\text{Mbit/s}$  的链路中传输, 发送时延为  $8 \times 10^{-4}\text{s}$ , 不考虑排队处理时延, 传输总时延为  $0.5008\text{s}$ 。显然, 传播时延几乎没有影响总时延 (总传送时间)。

此外, 由于排队往往具有随机性, 不是通信系统自己固有的特征, 一般不能将此作为影响带宽的因素。因此, 在图 1.3 所示的 3 个因素中, 发送速率是与总时延关系最密切的因素, 也是与信道带宽关系最密切的因素。例如, 一个长度为  $200\text{MB}$  (这里,  $1\text{M}$  为  $2^{20}=1\,048\,576$ ,  $1\text{B}=8\text{bit}$ ) 的数据块, 要在  $1\text{Mbit/s}$  (这里,  $1\text{M}=10^6$ ) 的链路中传输, 则发送时延不能超过  $200 \times 1048576 \times 8 / 10^6 = 1677.8\text{s}$ , 即必须在不超过近半小时的时间内把这个数据块发送完毕。但是若在带宽为  $100\text{Mbit/s}$  的链路上传输, 则必须在  $16.7\text{s}$  内将这些数据发送完毕。

注意, 使用带宽为  $2\text{Mbit/s}$  的接入网络, 并不等于每秒钟最高可以下载  $2\text{Mb}$  的数据。因为,  $2\text{Mb}=2000\text{ kb}=250\text{KB}$ , 即数据传输时奇偶校验位用了  $250\text{kb}$ , 所以每秒钟实际传输的数据量最大为  $2000\text{ kb}-250\text{kb}=1750\text{ kb}=1.75\text{Mb}$ 。

### 4. 服务质量

数据在一个计算机网络中传送, 犹如车辆在一个城市行驶, 常常会出现道路拥挤甚至堵塞的情形, 使时延超过允许的限度。网络服务质量 (Quality of Service, QoS) 就是当网络出现过载或拥塞时, 要保证重要的业务量不被延迟或丢失, 并使网络高效运行。

## 1.2 计算机网络分类

对计算机网络进行分类的标准很多, 如基于网速、基于协议、基于介质、基于功能、基于管辖权等。下面仅介绍两种主要分类方法。

## 1.2.1 按照地理覆盖范围分类

按网络覆盖的地理范围进行分类，一般将计算机网络分为4类：局域网、广域网、城域网、个人网。

### 1. 局域网

局域网（Local Area Network, LAN）覆盖范围一般在几千米以内，通常属于一个单位、一个部门或一个实验室，或在一幢大楼、一个校园、一个园区内。局域网的本质特征是作用范围小、传输速率高（通常为10Mbit/s~10Gbit/s）、延迟小、可靠性高。再加上LAN具有低成本、应用广、组网方便、使用灵活等特点，深受广大用户的欢迎。因此，LAN是目前发展最快、最活跃的一个分支。

### 2. 广域网

广域网（Wide Area Network, WAN）所覆盖的地理范围一般为几百千米到几千千米，因为其覆盖的范围广，故称其为广域网，也称远程网。它一般可以覆盖几个城市、地区，甚至国家或全球。这类网络出现得最早，其骨干网络一般是公用网，传输速率较高，能够达到若干Gbit/s。

### 3. 城域网

城域网（Metropolitan Area Network, MAN）原本指的是介于局域网与广域网之间的一种大范围的高速网络，其作用范围是从几千米到几十千米的城市。目前，随着网络技术的迅速发展，局域网、城域网和广域网的界限已经变得十分模糊。

### 4. 个人局域网

个人局域网（Personal Area Network, PAN）是在计算机网络大为普及、各种短距离无线通信技术不断发展的情况下出现的一种计算机网络形态。其特点是用无线电或红外线代替传统的有线电缆，实现个人信息终端的智能化互连，组建个人化的信息网络，适合于家庭与小型办公室的应用场合，其主要应用范围包括微信、QQ及信息电器互连与信息自动交换等。

PAN的实现技术主要有：Bluetooth、IrDA、Home RF、ZigBee、WirelessHart与UWB（Ultra-Wideband Radio）。

## 1.2.2 按网络拓扑结构分类

为了研究网络在物理上的连通性，可以将网络设备抽象为一些点，称为结点；把传输媒体抽象为线，称为链路。这种抽象结构称为网络拓扑结构。下面按照拓扑结构的特点，讨论网络分类。

### 1. 总线型拓扑

如图1.7（a）所示，在总线型拓扑结构中，网络中的所有结点都通过接口串接在一个叫做总线的单根传输线路上。每一个结点发送的信息都必须在总线上传输，且能被其他结点所接收。这种结构连接简单、易于安装、成本费用低。但是，在任何一个时间点上，网中只能有一个结点向外发送消息；否则，便产生冲突。同时为了防止信号到达线缆的端点时产生反射信号，引起与后续信号的冲突，必须在线缆的两端安装终结器以吸收端点信号。因此，一个结点要发送数据时，必须进行侦听，看总线是否有数据在传送，只有总线上无数据传送时，才可发送。但即使这样，也有可能产生两个结点同时侦听到总线上没有数据传送而同时发送引起的冲突。为此，需要一套规则对这种情况进行处理。此外，该结构的网络维护困难，一旦出现断点，整个网络将瘫痪，而且故障点很难查找。

### 2. 星型拓扑

如图1.7（b）所示，星型结构是指网络中的各结点通过点到点的方式连接到一个中心结点（又

称中央转接站,一般是集线器或交换机)上,中心结点控制全网的通信,向目的结点传送信息。

星型拓扑结构便于集中控制,任何两台计算机之间的通信都要通过中心结点来转接,网络延迟时间较小,传输误差较低,也易于维护和管理。但是要求中心结点必须具有极高的可靠性,因为中心结点一旦损坏,整个系统便趋于瘫痪。对此,中心结点通常采用双机热备份,以提高系统的可靠性。但由于通信线路专用,故电缆成本高。此外,在使用集成器的情况下,也会出现总线结构中的数据发送冲突。

### 3. 环型拓扑

如图 1.7 (c) 所示,将总线的首尾相连,就形成环型结构。为了避免环路上同时发送数据引起的冲突,在网络中要运行一种特殊的信号——令牌,令牌按顺时针方向传输。当某台计算机要发送信息时,必须先捕获令牌,再发送信息;发送信息后再释放令牌。与总线结构相似,这种网络实现简单,且传输介质适合采用光纤,以实现高速连接。但这种结构也存在致命的弱点,即网中任何一个结点出现故障,则导致全网瘫痪。

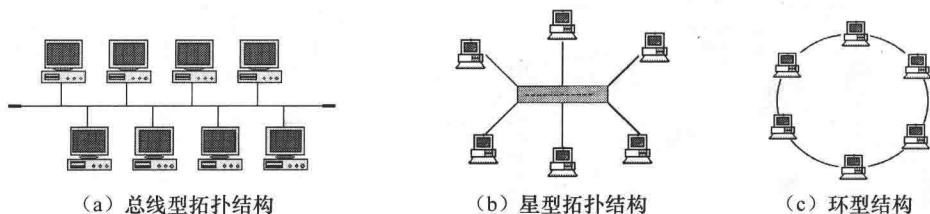


图 1.7 计算机网络基本拓扑结构 (1)

### 4. 树型拓扑

树型拓扑结构如图 1.8 (a) 所示,它是星型拓扑结构的拓展,它采用层次化的结构,具有一个根结点和多层分支结点。树型网络中除了叶子结点外,所有分支结点都是转发结点。它的各个结点按层次进行连接,数据的交换主要在上下结点间进行,相邻的结点之间一般不进行数据交换。树形结构属于集中控制式网络,适用于分级管理的场合。

树型拓扑结构比较简单,成本低,扩充结点方便灵活。但是该结构对根结点(相当于星型拓扑中的中心结点)的依赖性大,一旦根结点出现故障,将导致全网不能工作;电缆成本高。

### 5. 网状拓扑

网状拓扑结构如图 1.8 (b) 所示,其特点是任意一个结点至少有两条线路与其他结点相连,或者说每个结点至少有两条链路与其他结点相连。在极端情况下,会形成网络中所有结点都互连的全连网状结构,如图 1.8 (c) 所示。这种结构的优点是不受瓶颈问题和失效问题的影响。由于结点之间有许多条路径相连,可靠性高;便于选择最佳路径,减少时延,改善流量分配,提高网络性能。但网状拓扑结构复杂,不易管理和维护,线路成本高。网状拓扑结构适合大型广域网路径选择。

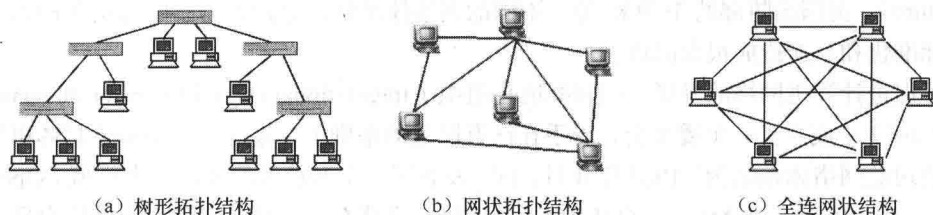


图 1.8 计算机网络基本拓扑结构 (2)

## 6. 混合式拓扑

目前的局域网都不采用单纯的某一种网络拓扑结构，而是根据具体需要和环境将几种网络结构进行综合。常见的混合式网络拓扑结构有星网型、星总形结构和星环型结构等。也有3种以上基本结构结合的，如图1.9（a）所示。

## 7. 蜂巢拓扑

蜂窝拓扑结构是无线网络中常用的结构。在无线网络中，建有许多基站，每个基站充当星形结构中的中心结点，控制其辐射范围内的用户无线设备。各基站的辐射区域形成如图1.9（b）所示的蜂巢形状。蜂巢网络拓扑适用于城市网、校园网、企业网。

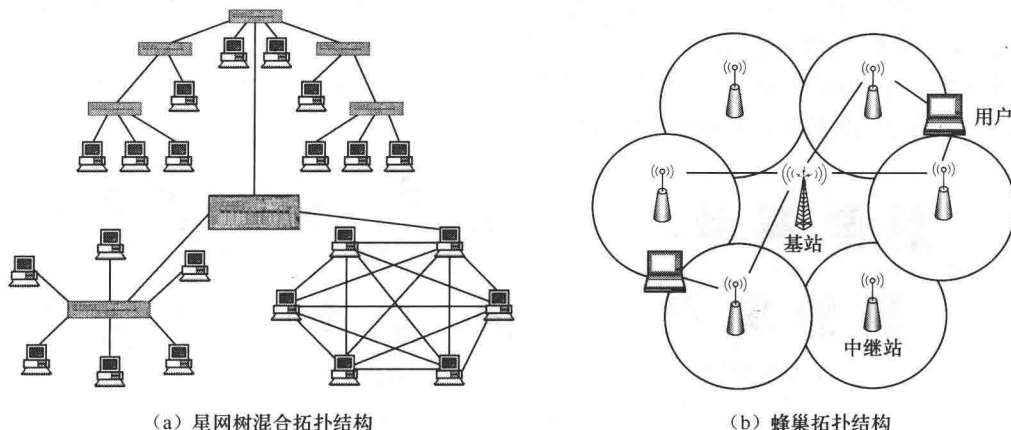


图 1.9 计算机网络基本拓扑结构（3）

# 1.3 ISO/OSI-RM 体系结构

## 1.3.1 OSI/RM 概述

20 世纪 50 年代初，美国为了自身的安全，在美国本土北部和加拿大境内建立了一个半自动地面防空系统 SAGE（赛其系统），进行了计算机技术与通信技术相结合的尝试。从而开辟了一条通向计算机网络的先河。进入 20 世纪 70 年代末期，计算机网络的发展已经势不可挡。为了抢占这一“制高点”，IBM 公司于 1974 年公布了 SNA（IBM Systems Network Architecture，IBM 系统网络体系结构）模型。接着，其他商家也推出自己的网络体系，如 DEC 的数字网络体系结构 DNA（Digital Network Architecture）、UNIVAC 的分布式计算机体系结构 DCA（Data Communication Architecture）、美国国防部的 TCP/IP 等。不同的网络体系结构分别有自己的层次结构和协议，这给网络标准化和互连造成很大困难。

为了促进计算机网络的发展，国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）于 1977 年成立了一个委员会，着手在已有网络的基础上，建立一个不基于具体机型、操作系统或公司的网络体系结构。1982 年 4 月，ISO 发布了一个开放系统互连参考模型（Open System Interconnection/Reference Model, OSI/RM）的国际标准草案，它是一个建立在传输介质基础上的 7 层模型，如图 1.10 所示。

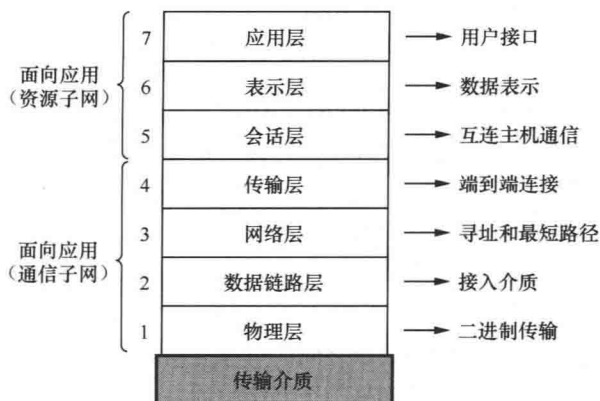


图 1.10 OSI/RM 的 7 层模型

OSI/RM 划分层次的原则如下。

- (1) 网路中各结点都有相同的层次。
- (2) 不同结点的同等层具有相同的功能。
- (3) 同一结点内相邻层之间通过接口通信。
- (4) 每一层使用下层提供的服务，并向其上层提供服务。
- (5) 不同结点的同等层按照协议实现对等层之间的通信。

## 1.3.2 OSI/RM 各层的功能

### 1. 物理层

OSI/RM 的 7 层中以传输介质为基础，但不包括传输介质，这样就可以使这个标准具有一定灵活性。因此，物理层（Physical Layer, PHL）就是 OSI 参考模型的最低层。这一层的核心是如何保证数字信号在物理介质上可靠地传输，并不关心这些比特的含义。具体一点说，该层定义了物理链路的建立、维护和拆除，包括信号线的功能、“0”和“1”信号的电平表示、数据传输速率、物理连接器规格及其相关的属性等。

### 2. 数据链路层

在物理层解决了数字信号的可靠传输的基础上，就要考虑同一网络中两个结点（如图 1.11 中所示的 A 与 B）之间的数据传输问题。这同一网络中的两个结点之间的数据通路就称为链路（Link）。所以这一层称为数据链路层（Data Link Layer, DL）。这一层要解决一个结点所连接的链路上的数据交换问题。具体地说，数据链路层要解决如下问题。

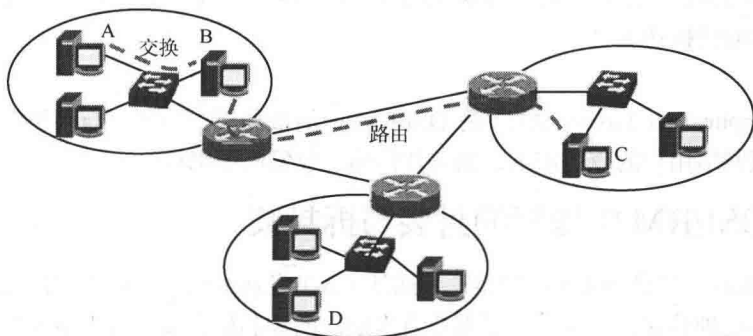


图 1.11 交换与路由

(1) 一个结点可能是星形结构, 即它连接多个了链路。因此首先要考虑传输时往哪个结点传输, 为此要解决地址问题。这个地址用所连接的设备地址表示, 称为物理地址, 又称媒体访问控制 (Media Access Control/Medium Access Control, MAC) 地址。

(2) 要保证在链路上可靠传送, 就要关心如何发现和处理传输中的错误, 主要的技术是数据校验码、确认和反馈重发等。

(3) 一个链路两端的收发速率往往不同, 如果发得快, 收得慢, 就会造成缓冲器溢出及链路上的拥挤、阻塞, 所以需要进行流量控制。

### 3. 网络层

数据链路层解决的是一个网络中的结点之间的可靠通信问题。在此基础上, 要解决某个网络中的一台主机发送的数据如何才能传送到另一个网络中的一台主机中, 也就是要解决网络之间输出传送的路径——路由, 这就是网路层 (Network Layer, NL) 的职责。如图 1.11 中所示的 B 主机到 C 主机之间的通信, 在这个层次上所通过的结点称为路由结点, 路由结点上的设备称为路由器。因此可以说, 有源主机到达目的主机的路径是由该路径上路由结点作为一个个驿站实现的。

为避免通信子网中出现过多的数据包而造成网络阻塞, 网络层还需要对流入的数据包数量进行控制 (拥塞控制)。

### 4. 传输层

数据是由位于源主机上的某种应用进程 (程序运行) 发出, 并且由位于目的主机上的进程接收的。而一个主机可以同时运行多个进程。为了区别它们, 把一种应用进程称为一个端口。即数据实际上是在两个端口之间流动的。因此, 在网络层解决了位于不同网络中的主机之间通信的基础上, 还需要进一步解决端口之间的通信问题, 这就是运输层 (Transport Layer, TL) 的职责, 它的作用是为上层提供端口到端口之间可靠、透明数据传输的服务, 包括处理差错控制和流量控制等问题, 使上层只看到在两个传输实体间的一条可由用户控制和设定的、可靠的数据通路。

### 5. 会话层

传输层为两个进程之间的通信提供了保障。在此基础上需要一套管理和协调不同主机上各种进程之间的对话的机制, 即负责建立、管理和终止应用程序之间的会话, 这就是会话层 (Session Layer, SL) 的职责。

### 6. 表示层

表示层 (Presentation Layer, PL) 处理流经结点的数据编码的表示方式问题, 以保证一个系统应用层发出的信息可被另一系统的应用层读出。如果必要, 该层可提供一种标准表示形式, 用于将计算机内部的多种数据表示格式转换成网络通信中采用的标准表示形式。数据压缩和加密也是表示层可提供的转换功能之一。

### 7. 应用层

应用层 (Application Layer, AL) 是 OSI/RM 中的最高层, 是用户与网络的接口。该层通过应用程序来完成网络用户的应用需求, 如文件传输、收发电子邮件等。

## 1.3.3 OSI/RM 中数据的封装与拆封装

如图 1.12 所示, 按照 OSI/RM 模型, 发送端 (A) 发送的数据是应用程序发出的, 然后沿着协议向下一层一层地传递, 每经过一层都要将本层次的控制信息加入数据单元的头部, 有些层还要将校验和等信息附加到数据单元的尾部, 这个过程叫做封装。