



408 计算机网络全册讲义

北街学长倾力之作

作者：北街

时间：2025/08/17

版本：1.0



目录

第一章 计算机网络概述	1
1.1 计算机网络的定义、组成与功能	1
1.1.1 计算机网络的定义	1
1.1.1.1 官方定义	1
1.1.1.2 通俗理解	1
1.1.1.3 定义中的关键要素分析	1
1.1.1.4 408 考试重点提醒	2
1.1.2 计算机网络的组成	2
1.1.2.1 硬件组成——网络的“筋骨”	2
1.1.2.2 软件组成——网络的“大脑”	3
1.1.2.3 按功能划分的组成结构	4
1.1.2.4 生动比喻——网络就是“数字城市”	4
1.1.2.5 408 考试重点提醒	4
1.1.3 计算机网络的功能	4
1.1.3.1 功能概览——网络的“十八般武艺”	5
1.1.3.2 1. 资源共享——网络的“共产主义理想”	5
1.1.3.3 2. 数据通信——网络的“千里传音”	5
1.1.3.4 3. 分布式处理——网络的“众人拾柴火焰高”	6
1.1.3.5 4. 负载均衡——网络的“交通疏导”	6
1.1.3.6 5. 提高可靠性——网络的“备胎机制”	6
1.1.3.7 6. 降低成本——网络的“省钱妙招”	7
1.1.3.8 408 考试重点提醒	7
1.2 计算机网络的分类	7
1.2.1 按覆盖范围分类	7
1.2.1.1 个人区域网络（PAN - Personal Area Network）	7
1.2.1.2 局域网（LAN - Local Area Network）	8
1.2.1.3 城域网（MAN - Metropolitan Area Network）	8
1.2.1.4 广域网（WAN - Wide Area Network）	9
1.2.1.5 网络范围对比表	9
1.2.2 按拓扑结构分类	10
1.2.2.1 总线型拓扑	10
1.2.2.2 星型拓扑	10
1.2.2.3 环型拓扑	11
1.2.2.4 网状拓扑	11
1.2.3 按传输介质分类	11
1.2.3.1 有线网络	11
1.2.3.2 无线网络	12
1.2.4 按通信方式分类	12
1.2.4.1 点对点网络（Point-to-Point）	12
1.2.4.2 多点网络（Multi-point）	12
1.2.4.3 408 考试重点提醒	12

1.3 计算机网络的标准化工作及相关组织	12
1.3.1 ISO 国际标准化组织	12
1.3.2 ITU 国际电信联盟	13
1.3.3 IEEE 电气电子工程师协会	13
1.3.4 IETF 互联网工程任务组	13
1.3.5 四大组织“谁管什么”——一图速记	14
1.3.6 408 考试高频对比与易混点	14
1.4 计算机网络体系结构与参考模型	14
1.4.1 网络体系结构的基本概念	14
1.4.2 OSI 七层参考模型	15
1.4.3 TCP/IP 四层模型	15
1.4.4 五层参考模型	16
1.4.5 各层协议与功能	16
第二章 物理层	17
2.1 通信基础	17
2.1.1 数据通信的基本概念	17
2.1.2 信号的传输	18
2.1.3 信道容量	19
2.1.4 奈奎斯特定理和香农定理	20
2.2 传输介质	22
2.2.1 有线传输介质	22
2.2.1.1 双绞线	22
2.2.1.2 同轴电缆	22
2.2.1.3 光纤	22
2.2.2 无线传输介质	23
2.2.2.1 无线电波	23
2.2.2.2 微波	23
2.2.2.3 红外线	23
2.3 传输方式	24
2.3.1 串行传输和并行传输	24
2.3.2 同步传输和异步传输	24
2.3.3 单向通信双向交替通信和双向同时通信	25
2.4 物理层设备	26
2.4.1 中继器	26
2.4.2 集线器	27
2.5 编码与调制	28
2.5.1 编码与调制的基本概念	28
2.5.2 数字信号的编码	29
2.5.2.1 曼彻斯特编码	30
2.5.2.2 差分曼彻斯特编码	31
2.5.2.3 双极性不归零 (AMI, Bipolar NRZ)	31
2.5.2.4 双极性归零 (Bipolar RZ)	31
2.5.3 模拟信号的调制	31
2.5.4 信道复用技术	33

2.5.4.1 频分复用 FDM	33
2.5.4.2 时分复用 TDM	35
2.5.4.3 波分复用	35
2.5.4.4 码分复用 CDM	35
第三章 数据链路层	37
3.1 数据链路层的功能	37
3.1.1 为网络层提供服务	37
3.1.2 数据链路管理	39
3.1.3 帧同步	39
3.1.4 流量控制	39
3.1.5 差错控制	39
3.2 组帧	39
3.2.1 字符计数法	39
3.2.2 字符填充法	39
3.2.3 零比特填充法	39
3.2.4 违法编码法	39
3.3 差错控制	39
3.3.1 差错的产生与分类	39
3.3.2 检错编码	39
3.3.2.1 奇偶校验码	39
3.3.2.2 循环冗余码 CRC	39
3.3.3 纠错编码	39
3.3.3.1 海明码	39
3.4 流量控制与可靠传输机制	39
3.4.1 流量控制	39
3.4.2 停止-等待协议	39
3.4.3 后退 N 帧协议	39
3.4.4 选择重传协议	39
3.5 介质访问控制	39
3.5.1 介质访问控制的基本概念	39
3.5.2 静态划分信道	39
3.5.2.1 频分多路复用 FDM	39
3.5.2.2 时分多路复用 TDM	39
3.5.2.3 波分多路复用 WDM	39
3.5.2.4 码分多路复用 CDM	39
3.5.3 动态分配信道	39
3.5.3.1 ALOHA 协议	39
3.5.3.2 CSMA 协议	39
3.5.3.3 CSMA/CD 协议	39
3.5.3.4 CSMA/CA 协议	39
3.6 局域网	39
3.6.1 局域网的基本概念和体系结构	39
3.6.2 以太网	39
3.6.2.1 以太网的发展	39

3.6.2.2 以太网的 MAC 帧格式	39
3.6.2.3 高速以太网	39
3.6.3 无线局域网	39
3.6.3.1 IEEE 802.11	39
3.6.3.2 无线局域网的组成	39
3.6.3.3 虚拟局域网 VLAN	39
3.7 广域网	39
3.7.1 广域网的基本概念	39
3.7.2 PPP 协议	39
3.7.3 PPP 协议	39
3.7.4 PPP 的帧格式	39
3.7.5 PPP 协议的工作状态	39
3.7.6 HDLC 协议	39
3.8 数据链路层设备	39
3.8.1 网桥	39
3.8.2 局域网交换机	39
第四章 网络层	40
4.1 网络层的功能	41
4.1.1 异构网络互连	41
4.1.2 路由与转发	41
4.1.3 拥塞控制	41
4.2 路由算法	41
4.2.1 静态路由与动态路由	41
4.2.2 距离向量路由算法	41
4.2.3 链路状态路由算法	41
4.2.4 层次路由	41
4.3 IPv4	41
4.3.1 IPv4 地址	41
4.3.1.1 IPv4 地址格式	41
4.3.1.2 分类编址	41
4.3.1.3 无分类编址 CIDR	41
4.3.1.4 特殊 IP 地址	41
4.3.2 IPv4 数据报格式	41
4.3.3 IPv4 数据报的分片与重组	41
4.4 IPv6	41
4.4.1 IPv6 的特点	41
4.4.2 IPv6 地址	41
4.4.3 IPv6 数据报格式	41
4.4.4 从 IPv4 到 IPv6 的过渡	41
4.5 路由协议	41
4.5.1 自治系统	41
4.5.2 域内路由协议	41
4.5.2.1 RIP 协议	41
4.5.2.2 OSPF 协议	41

4.5.3 域间路由协议	41
4.5.3.1 BGP 协议	41
4.6 网际控制协议 ICMP	41
4.6.1 ICMP 的基本概念	41
4.6.2 ICMP 报文格式	41
4.6.3 ICMP 的常见类型	41
4.6.4 ICMP 的应用	41
4.7 虚拟专用网和网络地址转换 NAT	41
4.8 IP 多播	41
4.8.1 IP 多播的基本概念	41
4.8.2 IP 多播地址	41
4.8.3 IGMP 协议	41
4.8.4 多播路由算法	41
4.9 移动 IP	41
4.9.1 移动 IP 的基本概念	41
4.9.2 移动 IP 的工作原理	41
4.10 软件定义网络 SDN	41
4.11 网络层设备	41
4.11.1 路由器	41
4.11.2 三层交换机	41
第五章 传输层	42
5.1 传输层提供的服务	42
5.1.1 传输层的功能	42
5.1.2 传输层的寻址与端口	42
5.1.3 无连接服务与面向连接服务	42
5.2 UDP 协议	42
5.2.1 UDP 的特点	42
5.2.2 UDP 报文段格式	42
5.2.3 UDP 校验	42
5.3 TCP 协议	42
5.3.1 TCP 的特点	42
5.3.2 TCP 报文段格式	42
5.3.3 TCP 连接管理	42
5.3.3.1 TCP 连接建立	42
5.3.3.2 TCP 连接释放	42
5.3.3.3 TCP 有限状态机	42
5.3.4 TCP 可靠传输	42
5.3.4.1 序号与确认号	42
5.3.4.2 重传机制	42
5.3.4.3 滑动窗口	42
5.3.5 TCP 流量控制	42
5.3.6 TCP 拥塞控制	42
5.3.6.1 慢开始	42
5.3.6.2 拥塞避免	42

5.3.6.3 快重传	42
5.3.6.4 快恢复	42
第六章 应用层	43
6.1 网络应用模型	44
6.1.1 客户/服务器模型	44
6.1.2 P2P 模型	44
6.2 DNS 系统	44
6.2.1 域名系统的层次结构	44
6.2.2 域名解析过程	44
6.2.3 DNS 报文格式	44
6.3 FTP 协议	44
6.3.1 FTP 的工作原理	44
6.3.2 FTP 连接	44
6.3.3 FTP 数据传输模式	44
6.4 电子邮件	44
6.4.1 电子邮件系统组成	44
6.4.2 简单邮件传输协议 SMTP	44
6.4.3 邮局协议 POP3	44
6.4.4 网际邮件访问协议 IMAP	44
6.4.5 电子邮件格式与 MIME	44
6.5 万维网 WWW	44
6.5.1 万维网的概念与组成	44
6.5.2 超文本传输协议 HTTP	44
6.5.2.1 HTTP 的特点	44
6.5.2.2 HTTP 报文格式	44
6.5.2.3 HTTP 状态码	44
6.5.2.4 Cookie 与 Session	44
6.5.3 万维网缓存与代理服务器	44
第七章 网络安全基础	45
7.1 网络安全概述	45
7.1.1 网络安全的基本概念	45
7.1.2 网络攻击与威胁	45
7.1.3 网络安全策略	45
7.2 加密技术	45
7.2.1 对称加密	45
7.2.2 非对称加密	45
7.2.3 数字签名	45
7.2.4 报文摘要	45
7.3 认证技术	45
7.3.1 身份认证	45
7.3.2 数字证书	45
7.3.3 公钥基础设施 PKI	45
7.4 网络安全协议	45

7.4.1 IPSec	45
7.4.2 SSL/TLS	45
7.4.3 HTTPS	45
7.5 防火墙技术	45
7.5.1 防火墙的基本概念	45
7.5.2 防火墙的分类	45
7.5.3 防火墙的配置策略	45
第八章 408 真题考点总结	46
8.1 历年高频考点	46
8.1.1 OSI 模型与 TCP/IP 模型	46
8.1.2 以太网与 CSMA/CD	46
8.1.3 IP 地址与子网划分	46
8.1.4 路由算法与路由协议	46
8.1.5 TCP 协议特性	46
8.1.6 DNS 域名解析	46
8.1.7 HTTP 协议	46
8.2 重点计算题型	46
8.2.1 子网划分计算	46
8.2.2 滑动窗口计算	46
8.2.3 RTT 与超时重传	46
8.2.4 信道利用率计算	46
8.2.5 CRC 校验计算	46
8.3 应试技巧与答题策略	46
8.3.1 选择题技巧	46
8.3.2 综合应用题策略	46
8.3.3 时间分配建议	46

第一章 计算机网络概述

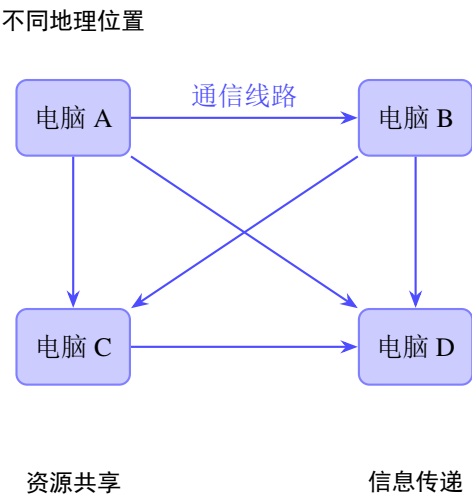
1.1 计算机网络的定义、组成与功能

1.1.1 计算机网络的定义

计算机网络就像是一个巨大的”朋友圈”，只不过这个朋友圈里的”朋友”都是计算机设备。想象一下，如果你家里的电脑、手机、平板、智能电视都能互相聊天、分享文件，甚至一起玩游戏，那就是计算机网络的魅力所在！

1.1.1.1 官方定义

** 计算机网络是指将地理位置不同的具有独立功能的多台计算机及其外部设备，通过通信线路连接起来，在网络操作系统、网络管理软件及网络通信协议的管理和协调下，实现资源共享和信息传递的计算机系统。**
这个定义听起来很官方对不对？让我们把它”翻译”成人话：



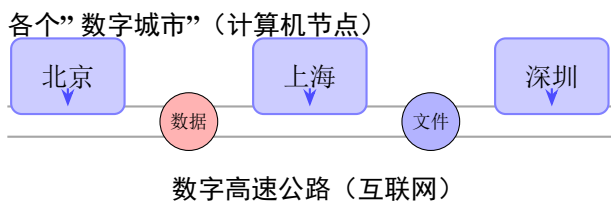
1.1.1.2 通俗理解

- 把计算机网络想象成一个”智能社区”：
- 居民：各种计算机设备（就像社区里的住户）
 - 道路：通信线路（连接各家各户的道路网络）
 - 交通规则：网络协议（大家都要遵守的”行车规则”）
 - 社区管理：网络操作系统（负责维护秩序的物业管理）
 - 目标：资源共享和信息交流（邻里互助，分享资源）

1.1.1.3 定义中的关键要素分析

关键要素	详细解释
独立功能	每台计算机都有自己的”人格”——独立的处理能力、存储能力和运行程序的能力。它们不是”傀儡”，而是有”思想”的个体。
通信线路	就像人与人之间需要语言交流一样，计算机之间需要”说话的渠道”。可以是网线、WiFi、光纤，甚至是卫星信号。

网络协议	这是计算机界的”世界语”。就像我们说中文、英文一样，计算机也需要统一的”语言”来交流，比如 TCP/IP 协议。
资源共享	这是网络的精髓！就像室友可以共享 WiFi、打印机一样，网络让计算机可以共享文件、程序、甚至计算能力。
信息传递	计算机之间可以发送消息、传输文件、视频通话等。就像微信群聊，但参与者是计算机。



在这个比喻中：

- 高速公路 = 网络基础设施（光纤、路由器等）
- 城市 = 网络中的计算机节点
- 汽车 = 传输的数据包
- 交通规则 = 网络协议
- 目的地 = 实现资源共享和信息传递

1.1.1.4 408 考试重点提醒

考试高频考点：

1. 计算机网络定义中的**关键要素**（地理分布、独立功能、互连、协议、共享）

2. 网络与分布式系统的**区别**（网络强调通信，分布式强调协作）

3. 计算机网络的**本质目标**：资源共享和信息传递

小贴士：记住计算机网络就是让” 散落各地的计算机朋友们手牵手，一起分享，共同成长”！

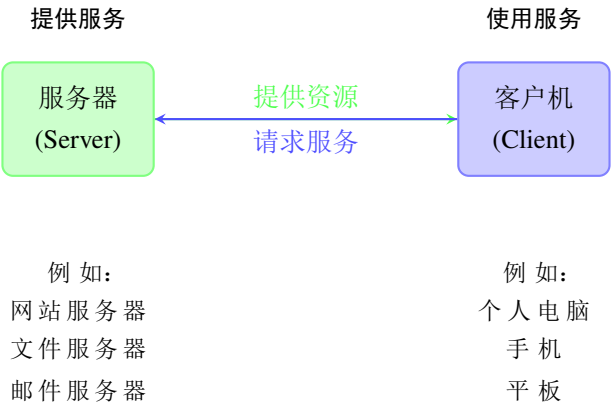
1.1.2 计算机网络的组成

计算机网络就像搭积木一样，由各种不同的” 积木块” 组合而成。每个积木块都有自己独特的作用，缺一不可！让我们来看看这个” 网络积木盒” 里都有什么宝贝。

1.1.2.1 硬件组成——网络的” 筋骨”

1. 计算机主机（Host）

主机就是网络中的” 居民”，分为两大类：



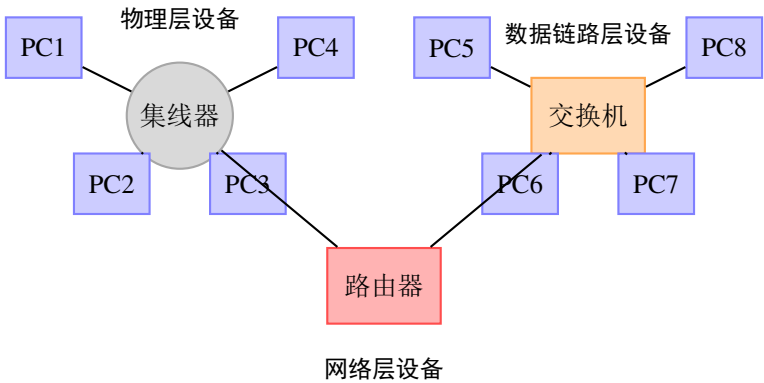
2. 通信链路（Communication Link）

通信链路就是网络的”血管系统”，负责在设备之间传输数据：

类型	特点	生活例子
有线链路	稳定可靠，速度快，但布线麻烦	就像家里的网线，稳定但不能随便移动
无线链路	灵活方便，但容易受干扰	就像 WiFi，方便但信号会被墙壁影响
光纤链路	速度超快，距离超远	就像高铁，又快又远，但造价昂贵

3. 交换设备（Switching Equipment）

交换设备是网络中的”交通枢纽”，负责数据的转发和路由：



1.1.2.2 软件组成——网络的”大脑”

网络硬件只是”身体”，软件才是”灵魂”！

1. 网络操作系统

就像手机需要 iOS 或 Android 系统一样，网络也需要专门的操作系统：

- 功能：管理网络资源，提供网络服务
- 举例：Windows Server、Linux、Unix
- 比喻：就像一个超级管家，负责分配房间、管理钥匙、安排访客

2. 网络协议

协议是网络世界的”法律条文”，规定了数据传输的规则：

协议栈	应用层协议 (HTTP, FTP, SMTP)	应用程序间通信
	传输层协议 (TCP, UDP)	端到端可靠传输
	网络层协议 (IP, ICMP)	路径选择和寻址
	数据链路层协议 (Ethernet, WiFi)	相邻节点通信
	物理层协议 (电信号, 光信号)	比特流传输

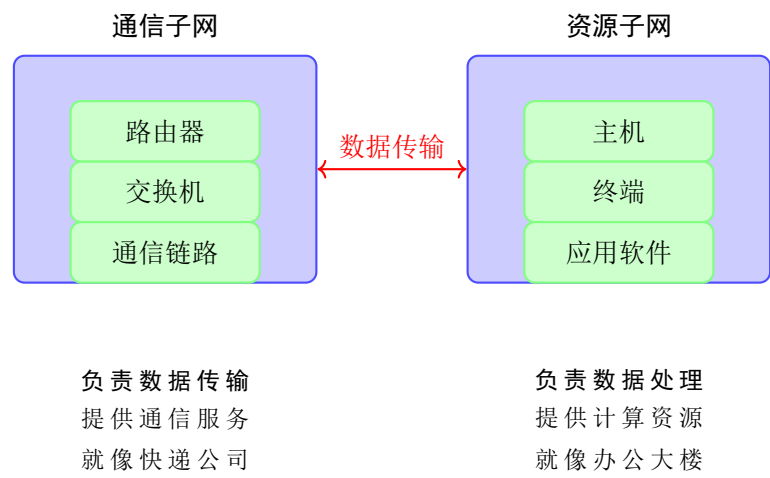
3. 应用软件

这些是用户直接接触的软件，就像手机上的各种 APP：

- 浏览器：Chrome、Firefox（用来上网冲浪的）
- 即时通讯：微信、QQ（用来聊天吹水的）
- 文件传输：FTP 客户端（用来传输文件的）
- 邮件客户端：Outlook、Thunderbird（用来收发邮件的）

1.1.2.3 按功能划分的组成结构

计算机网络从功能角度可以分为两个子网：



1.1.2.4 生动比喻——网络就是”数字城市”

把计算机网络想象成一个完整的现代化城市：

网络组件	城市对应物	功能说明
主机	居民楼、办公楼	提供居住和工作场所
路由器	交通信号灯	指挥交通流向
交换机	立交桥	连接不同道路
通信链路	道路系统	承载交通流量
协议	交通法规	规范行车秩序
数据包	汽车	承载乘客和货物
网络操作系统	城市管理部门	统一规划和管理

1.1.2.5 408 考试重点提醒

必考知识点：

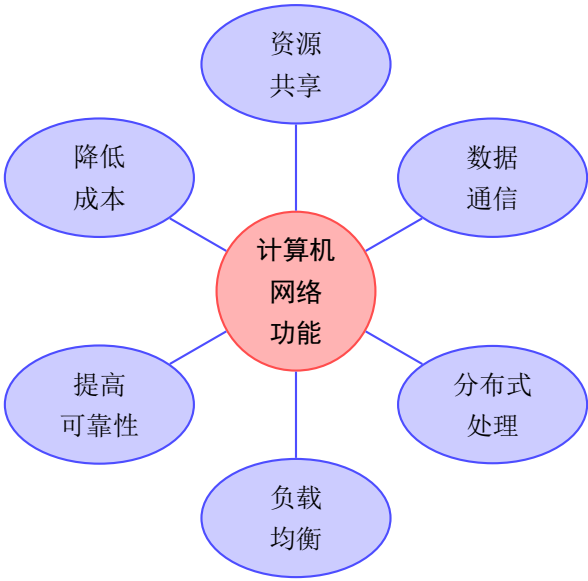
1. 网络的硬件组成：主机、通信链路、交换设备
2. 网络的软件组成：网络操作系统、协议、应用软件
3. 通信子网 vs 资源子网的区别和联系
4. 各种网络设备的工作层次（物理层、数据链路层、网络层）

记忆口诀：硬件软件两大类，主机链路加交换，系统协议和应用，通信资源分两边！

1.1.3 计算机网络的功能

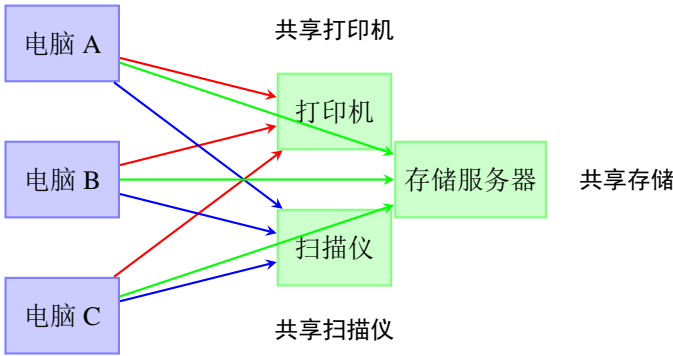
如果说网络的组成告诉我们”网络是什么”，那么网络的功能就告诉我们”网络能干什么”。计算机网络就像一个超级多功能工具箱，每个功能都能让我们的数字生活更加精彩！

1.1.3.1 功能概览——网络的”十八般武艺”



1.1.3.2 1. 资源共享——网络的”共产主义理想”

资源共享是计算机网络最重要的功能，就像室友之间共享 WiFi 密码一样自然！
硬件资源共享



软件资源共享
想象一下，如果每个人都要买正版 Adobe 全家桶，那得花多少钱？网络让我们可以共享软件许可：

- 应用程序共享：多用户共享同一个软件许可
- 数据库共享：大家都能访问同一个数据库
- 计算资源共享：借用别人的 CPU 和内存来加速计算

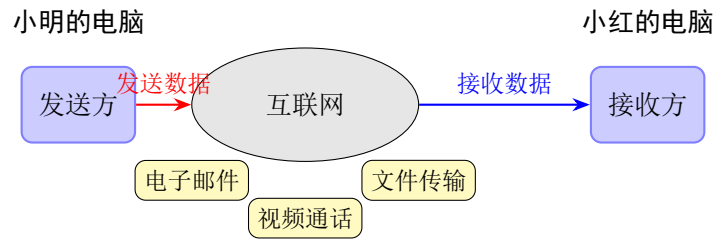
信息资源共享

这是最常见的共享方式，就像微信群里分享链接一样：

共享类型	实际例子	生活比喻
文件共享	百度网盘、OneDrive	就像公共图书馆，大家都能借书
网页内容	各种网站、博客	就像公告板，大家都能看信息
数据库	在线百科、论文库	就像超大型档案室
多媒体	YouTube、B 站	就像电影院，但是免费的

1.1.3.3 2. 数据通信——网络的”千里传音”

数据通信让相距千里的计算机能够”聊天”，就像古代的飞鸽传书，但速度是光速！

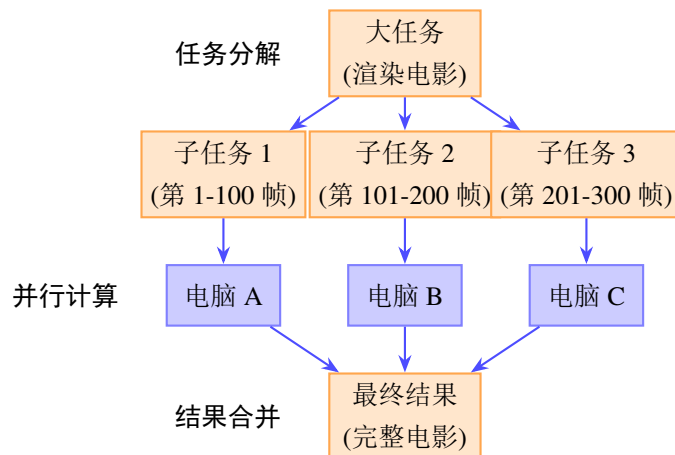


数据通信的特点：

- **高速**：光纤网络速度可达 Gbps 级别（比火箭还快！）
- **可靠**：有错误检测和纠正机制（不会搞丢你的作业）
- **实时**：支持实时通信（视频聊天不会有时差）
- **多样**：支持文字、图片、音频、视频（什么都能传）

1.1.3.4 3. 分布式处理——网络的“众人拾柴火焰高”

分布式处理就像大家一起做大作业，每个人负责一部分，最后合成完整的作品。

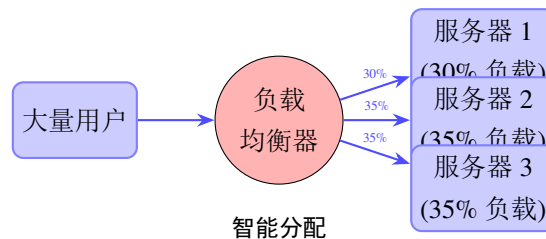


分布式处理的优势：

- **提高效率**：多台计算机同时工作，就像多人搬家比一人搬家快
- **容错能力**：一台机器坏了，其他机器继续工作
- **资源利用**：充分利用网络中闲置的计算资源

1.1.3.5 4. 负载均衡——网络的“交通疏导”

负载均衡就像交警指挥交通，让每条路都不会太拥堵。



1.1.3.6 5. 提高可靠性——网络的“备胎机制”

网络通过冗余设计提高可靠性，就像重要文件要备份一样。

可靠性措施：

- **数据备份**：重要数据存多份（鸡蛋不放一个篮子里）
- **路径冗余**：多条路径传输数据（一条路堵了走另一条）
- **设备冗余**：关键设备有备用（主力坏了上替补）
- **容错机制**：自动检测和修复错误（自动纠错）

1.1.3.7 6. 降低成本——网络的”省钱妙招”

网络让我们能够以更低成本获得更好的服务：

成本类型	传统方式	网络方式
硬件成本	每人买一台打印机	大家共享一台高级打印机
软件成本	每人买一份软件	网络版软件多人共享
维护成本	每台机器单独维护	集中管理，统一维护
通信成本	长途电话、传真	网络通信几乎免费

1.1.3.8 408 考试重点提醒

必考功能（按重要性排序）：

1. **资源共享**：最基本、最重要的功能
2. **数据通信**：网络存在的基础
3. **分布式处理**：现代网络的重要应用
4. **负载均衡**：提高系统性能
5. **可靠性**：系统稳定运行的保证
6. **成本效益**：网络应用的经济优势

记忆口诀：共享通信分布式，均衡可靠降成本，六大功能要记牢，考试必定能过关！

温馨提示：网络功能虽然很多，但**资源共享**永远是最核心的！就像朋友的意义不在于数量，而在于愿意分享。

1.2 计算机网络的分类

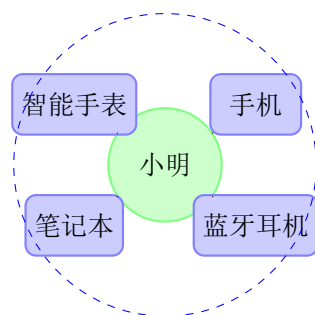
计算机网络就像动物王国一样丰富多彩，有各种各样的”物种”。不同的分类方法就像不同的观察角度，让我们能够更好地理解网络这个大家族！

1.2.1 按覆盖范围分类

这是最常见的分类方法，就像按照活动范围给动物分类：家养的、野生的、海洋的...

1.2.1.1 个人区域网络（PAN - Personal Area Network）

覆盖范围：10 米以内，就是你伸手够得着的范围

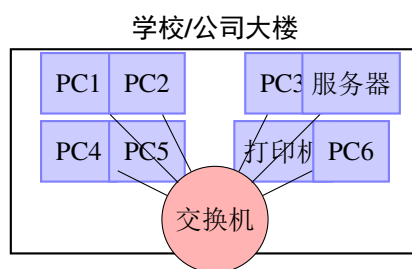


PAN 范围：10 米内

典型技术：蓝牙、红外线 生活例子：手机连蓝牙耳机、智能手表同步手机数据

1.2.1.2 局域网（LAN - Local Area Network）

覆盖范围：几百米到几公里，比如一栋楼、一个校园



LAN 范围：几百米到几公里

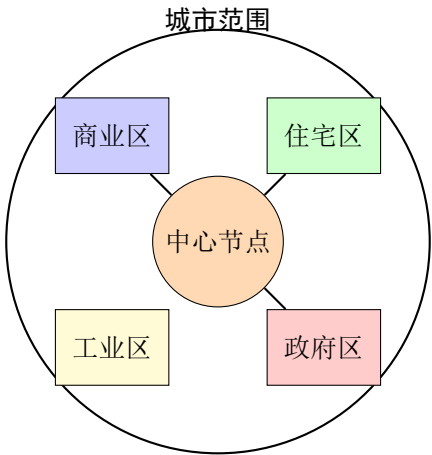
特点：

- 高速：通常 100Mbps-10Gbps
- 低延迟：响应快，适合实时应用
- 私有：通常由单一组织管理
- 可靠：错误率低，性能稳定

典型技术：以太网、WiFi

1.2.1.3 城域网（MAN - Metropolitan Area Network）

覆盖范围：几十公里，比如一个城市

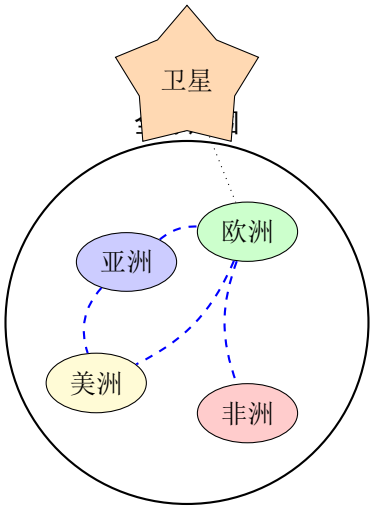


MAN 范围：几十公里（一个城市）

典型应用：城市光纤网络、有线电视网络 生活例子：城市的宽带网络、数字电视网络

1.2.1.4 广域网（WAN - Wide Area Network）

覆盖范围：几百公里到全球，跨越国家和大洲



WAN 范围：全球（互联网就是最大的 WAN）

特点：

- 覆盖面广：跨越地理边界
 - 传输延迟大：距离远导致延迟增加
 - 带宽有限：相对于 LAN 带宽较小
 - 复杂性高：涉及多个运营商和技术
- 典型技术：光纤、卫星、微波

1.2.1.5 网络范围对比表

网络类型	覆盖范围	典型技术	传输速度	生活例子
PAN	10 米内	蓝牙、红外	几 Mbps	手机连耳机
LAN	几公里	以太网、WiFi	100Mbps-10Gbps	校园网、家庭网
MAN	几十公里	光纤、有线电视	几十 Mbps-几 Gbps	城市宽带网

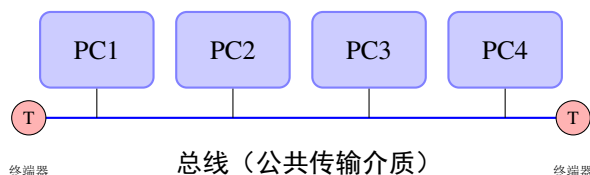
WAN	全球	光纤、卫星	几 Mbps-几 Gbps	互联网
-----	----	-------	---------------	-----

1.2.2 按拓扑结构分类

网络拓扑就像房子的建筑结构，决定了网络的“长相”和性能特点。

1.2.2.1 总线型拓扑

就像公交车站，大家都在同一条线上排队：



优点：

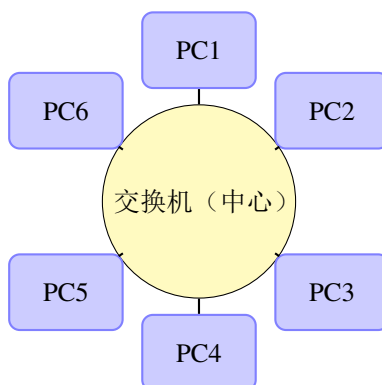
- 简单经济：布线简单，成本低（就像坐公交便宜）
- 易于扩展：添加节点容易

缺点：

- 可靠性差：总线断了全网瘫痪（公交车坏了大家都走不了）
- 性能下降：节点多了会冲突增加
- 故障定位难：不知道哪里出了问题

1.2.2.2 星型拓扑

就像太阳系，所有行星围绕太阳转：



优点：

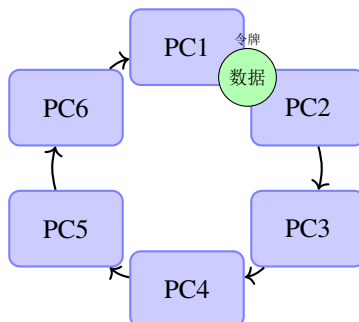
- 可靠性高：单个节点故障不影响其他节点
- 易于管理：集中控制，故障定位容易
- 性能好：每个节点独享带宽

缺点：

- 中心依赖：中心节点坏了全网瘫痪（太阳没了行星就乱套了）
- 布线成本高：需要大量线缆

1.2.2.3 环型拓扑

就像接龙游戏，大家手拉手围成圈：



优点：

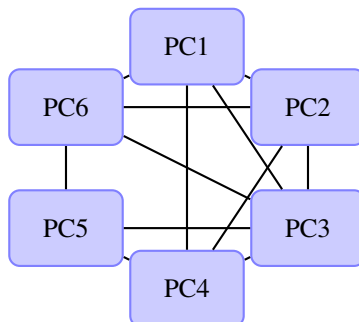
- 无冲突：令牌传递机制避免冲突
- 公平访问：每个节点都有平等机会

缺点：

- 可靠性差：一个节点坏了整个环就断了
- 延迟大：数据要绕一圈才能到达

1.2.2.4 网状拓扑

就像蜘蛛网，节点之间互相连接：



优点：

- 可靠性极高：多条路径，一条断了还有其他路
- 负载分散：流量可以分散到多条路径

缺点：

- 成本极高：需要大量连接线路（就像每家都要修路到每家）
- 管理复杂：路径选择和管理复杂

1.2.3 按传输介质分类

1.2.3.1 有线网络

就像自来水管，通过物理线缆传输数据：

- 双绞线网络：最常见，像电话线的升级版
- 同轴电缆网络：像有线电视线
- 光纤网络：用光传输，速度最快

1.2.3.2 无线网络

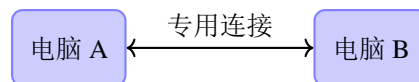
就像广播电台，通过空气传播信号：

- **WiFi 网络**：家庭和办公室常用
- **移动网络**：手机上网用的 3G/4G/5G
- **卫星网络**：偏远地区的救星

1.2.4 按通信方式分类

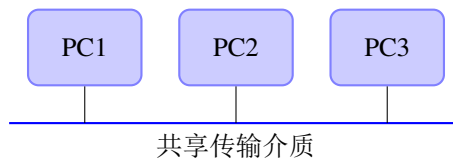
1.2.4.1 点对点网络（Point-to-Point）

就像打电话，两个人直接对话：



1.2.4.2 多点网络（Multi-point）

就像开会，多个人在一个房间里讨论：



1.2.4.3 408 考试重点提醒

必考分类重点：

1. 按覆盖范围：PAN < LAN < MAN < WAN（记住范围大小）
2. 按拓扑结构：星型最常用，总线型最经济，网状型最可靠
3. LAN 的特点：高速、低延迟、私有管理
4. WAN 的特点：覆盖广、延迟大、带宽有限

记忆口诀：个局城广按范围，总星环网看拓扑，有线无线看介质，点对多点看通信！

1.3 计算机网络的标准化工作及相关组织

网络世界要想“大家说同一种话”，必须靠标准来统一。标准化的目标是：互联互通、兼容性、可扩展、可维护，避免“你说你的，我说我的”。本节聚焦四大组织：ISO、ITU、IEEE、IETF——它们就像四位“网络立法者”，各管一摊，又相互协同。

1.3.1 ISO 国际标准化组织

定位与职责：非政府国际组织，覆盖工业与技术的广泛标准。在网络领域的核心贡献是 **OSI 参考模型** 与 **相关服务接口标准**。

代表性标准

标准/系列	作用说明
ISO 10646（Unicode 相关）	字符集标准，为跨语言信息交换打基础。

一眼记忆：**OSI 模型之父**，强调“分层与接口”。

1.3.2 ITU 国际电信联盟

定位与职责：联合国专门机构，负责全球电信/无线电频谱/卫星轨道协调与公用电信网相关标准。内部主要分为 **ITU-T**（电信标准化）与 **ITU-R**（无线电通信）。

代表性标准（多以字母系列命名）

系列/建议	作用说明
X 系列（数据通信/网络）	如 X.25 分组交换、 X.500 目录服务；为早期广域网、目录系统提供规范。
G 系列（传输系统）	光纤传输与编码，如 G.709 OTN 承载网框架，定义光传送网层次与帧结构。
H 系列（多媒体）	H.264/AVC 、 H.265/HEVC 等视频编码标准，影响流媒体与视频会议。
T 系列（传真/终端）	早期传真等终端通信协议。

一眼记忆：管“电信与线路承载”，从频谱到光纤再到编解码。

1.3.3 IEEE 电气电子工程师协会

定位与职责：学术性专业组织，制定大量局域网与链路层相关标准，最有影响力的是 **IEEE 802** 系列。

代表性标准

标准	作用说明
IEEE 802.3（以太网）	规定有线以太网的物理层与 MAC 子层，从 10Mb/s 到 100GbE/400GbE 不断演进（考试高频）。
IEEE 802.11（WLAN）	无线局域网标准（Wi-Fi），含 a/b/g/n/ac/ax 演进，定义信道、调制、MAC。
IEEE 802.1（桥接与 VLAN）	包括 802.1Q VLAN 、生成树协议 STP/RSTP/MSTP 等二层交换关键技术。
IEEE 802.15（WPAN）	个人区域网，如蓝牙（与 SIG 协作）、ZigBee 等低功耗短距网络。

一眼记忆：管“局域网二层技术”，以太网与 Wi-Fi 是其“门面担当”。

1.3.4 IETF 互联网工程任务组

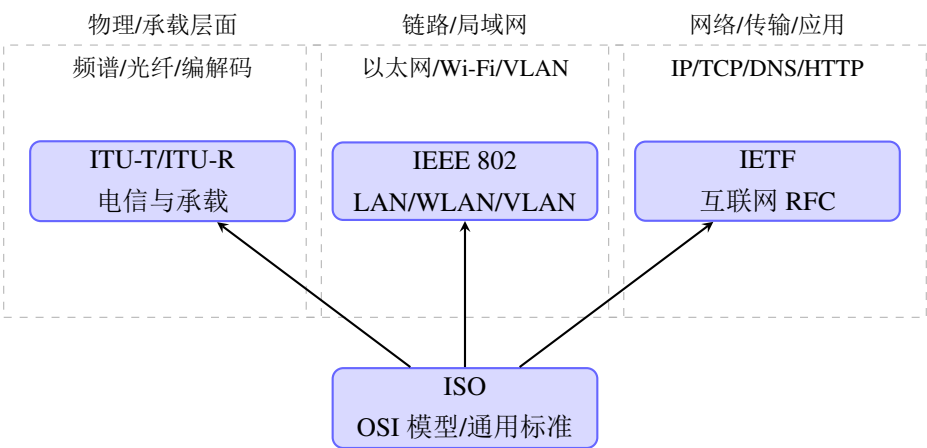
定位与职责：开放性、以工程实践为导向的互联网协议标准组织，标准文档称为 **RFC**。核心流程：Internet-Draft → RFC（分信息性、实验性、最佳现行实践 BCP、标准轨道 STD 等）。

代表性协议（RFC）

协议/系列	作用说明
TCP/IP（IPv4/IPv6、TCP、UDP）	互联网的基础协议族，涵盖寻址、路由、传输（考试顶流）。
DNS（RFC 1034/1035 及后续）	分布式命名系统，定义名称解析与消息格式。
HTTP/1.1、HTTP/2、HTTP/3	万维网应用协议，HTTP/3 基于 QUIC（UDP 之上）改善时延与拥塞表现。
TLS（原 SSL 演进）	传输层安全协议，保障 Web/邮件等的加密与认证。

一眼记忆：管“互联网与上层协议”，RFC 是“活文档”，强调可部署性与互操作。

1.3.5 四大组织“谁管什么”——图速记



1.3.6 408 考试高频对比与易混点

组织	关键词	易考点/易混淆
ISO	OSI 七层、接口	OSI 是框架/模型，不是具体协议；考“层与层的功能界限”。
ITU-T	X/G/H 系列、公网承载	常把 X.25 与 IP 混淆；G.709 与以太网的关系是承载与被承载。
IEEE	802.3/802.11/802.1Q	以太网=802.3、Wi-Fi=802.11、VLAN=802.1Q 要对号入座。
IETF	RFC、互联网协议	RFC 编号繁多，记住 TCP/IP、DNS、HTTP、TLS 是高频。

必背三句话：

- 1. **ISO——提模型（OSI）；IEEE——定二层（802.x）；IETF——管互联网（RFC）；ITU——管电信承载（X/G/H）。**
- 2. **OSI 是理论框架，TCP/IP 是事实标准（考试常考对比题）。**
- 3. **802.3= 以太网，802.11=Wi-Fi，802.1Q=VLAN（名称与编号要精准匹配）。**

记忆口诀：国（际）标找 **ISO**，电信承载看 **ITU**，局域二层问 **IEEE**，互联网协议找 **IETF**！

1.4 计算机网络体系结构与参考模型

1.4.1 网络体系结构的基本概念

网络体系结构是对网络功能进行分层、定义层间服务与接口、规定同层协议的一套蓝图。它回答三个问题：分几层？每层干啥？层与层怎么合作？

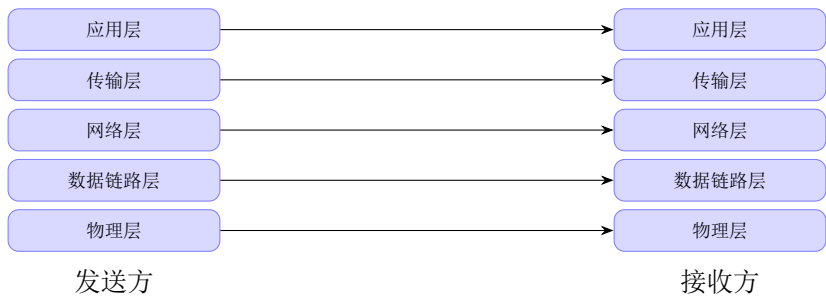
分层思想的好处

- **模块化**：各层相对独立，便于开发、测试与替换。
- **标准化**：清晰的接口（SAP/服务访问点），降低系统耦合。
- **互操作**：不同厂商实现可“对上对下”对接。
- **演进性**：单层升级不牵一发动全身。

术语小结（考试常考）：

- **服务**：下层向上层提供“能做什么”。

- **接口**：上层调用下层服务的入口（SAP）。
- **协议**：同层实体间“怎么做”的约定（语法/语义/时序）。
- **PDU 命名**：物理层比特、链路层帧、网络层分组/数据报、传输层段/报文段、应用层报文。



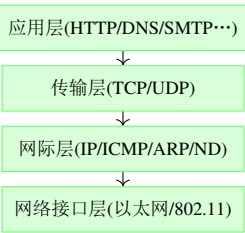
1.4.2 OSI 七层参考模型

七层职责速记：应（应用）表（表示）会（会话）传（传输）网（网络）数（数据链路）物（物理）。

层次	核心功能	PDU	典型要点
应用层	应用服务（HTTP/FTP/SMTP/…）	报文	Web/邮件/文件传输
表示层	数据表示、加密压缩、语法语义转换	报文	SSL/TLS 常被视作跨层（历史争议）
会话层	建立/管理/终止会话、同步、检查点	报文	检查点/恢复、全双工/半双工
传输层	端到端可靠/不可靠传输、复用分用、流量/差错控制	段	TCP、UDP
网络层	逻辑寻址与路由、分片与转发	分组/数据报	IPv4/IPv6、路由协议作用在此层次之上
数据链路层	成帧、差错检测、介质访问控制	帧	以太网、PPP、802.11、VLAN
物理层	比特传输、接口与电气特性	比特	电压/光信号、带宽、编码

1.4.3 TCP/IP 四层模型

- **应用层**：囊括 OSI 的应用/表示/会话（三层合一）。
- **传输层**：TCP、UDP。
- **网际层**：IP、ICMP、ARP/ND、路由。
- **网络接口层**：对应 OSI 的数据链路 + 物理。



对比要点：OSI 重理论分层与接口；TCP/IP 重实用可部署，事实标准地位明确。

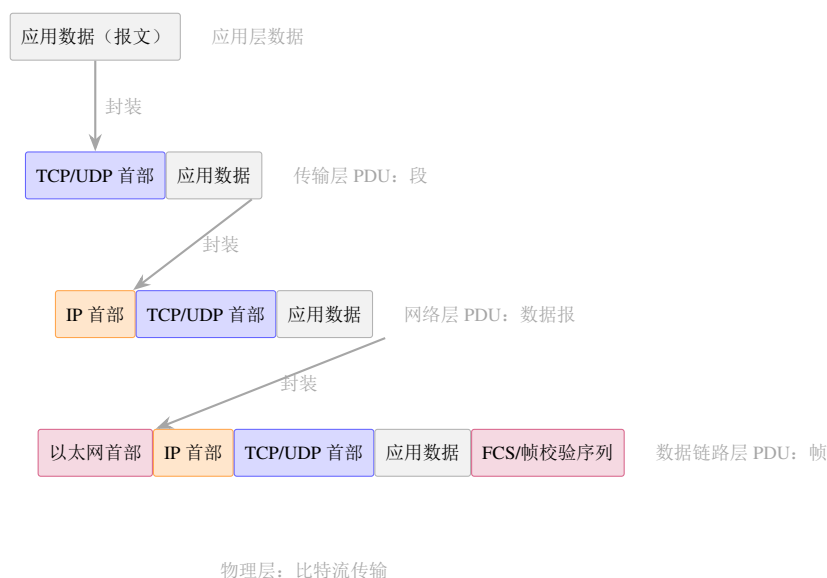
1.4.4 五层参考模型

教学与考试常用的“五层模型”介于两者之间：应用/传输/网络/数据链路/物理。它保留了链路层与物理层的区分，便于分别讨论成帧与比特传输。

层次	典型协议/功能
应用层	HTTP、DNS、SMTP/POP3/IMAP、FTP、DHCP、SSH、NTP
传输层	TCP（可靠、面向连接）、UDP（简单、开销低）
网络层	IPv4/IPv6、ICMP、路由协议运行其上（RIP/OSPF/BGP）
数据链路层	以太网（802.3）、无线 LAN（802.11）、PPP、VLAN（802.1Q）
物理层	双绞线、同轴、光纤；编码/调制；速率/带宽/误码率

1.4.5 各层协议与功能

封装/解封装示意（考试常画）



地址/标识与设备分层（必背）

层次	主要地址/标识	典型设备
应用层	URL/域名、应用端口（80/443/53…）	服务器软件/代理/负载均衡（逻辑）
传输层	端口号（TCP/UDP）	四层负载均衡/防火墙策略
网络层	IP 地址（IPv4/IPv6）	路由器、三层交换机
数据链路层	MAC 地址、VLAN ID	交换机、网桥、AP
物理层	物理接口/光模块/速率	中继器、集线器、线缆/光纤

408 必考要点与易错警示：

1. OSI vs TCP/IP 对应关系：应/表/会 ≈ 应用；链路 + 物理 ≈ 网络接口。
2. PDU 命名与层次设备：段-包/数据报-帧；集线器 L1，交换机 L2，路由器 L3。
3. 地址三件套：MAC 在二层，IP 在三层，端口在四层（三层三地址要对齐）。
4. 封装方向：发送端自上而下逐层加首部；接收端自下而上剥离首部。
5. 事实标准：TCP/IP 为事实标准；OSI 是理论模型（常考辨析）。

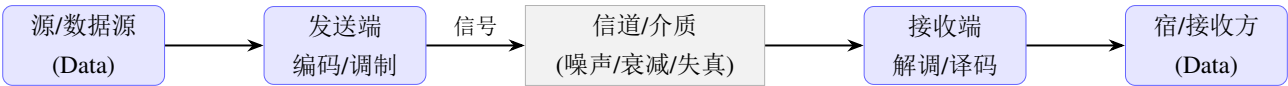
记忆口诀：上三为应表会，中层传网做转发；下二链物管介质，三址对应不混搭。

第二章 物理层

2.1 通信基础

2.1.1 数据通信的基本概念

数据通信就是把“信息”可靠地从甲地搬到乙地。为此，我们需要把数据变成可在物理介质上传输的“信号”，穿过有噪声、有衰减的“信道”，再在对端还原出来。



2.1.1.0.1 核心名词一次搞定

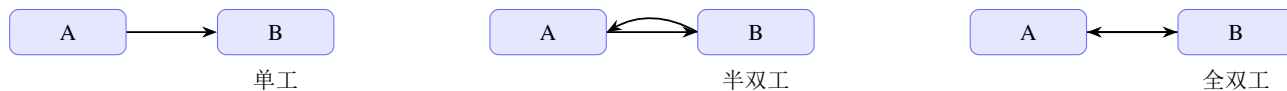
术语	要点解释（配考试高频点）
数据 (Data)	有意义的符号集合（文本、数值、图片、音频等）本身不等于可传输的电磁波。
信号 (Signal)	用物理量表示数据。模拟信号连续取值，数字信号离散取值。考试常问“模拟/数字”的差别与转换位置。
码元 (Symbol)	在单位时间内传送的基本离散信号波形，每个码元可承载多比特： M 元码元可承载 $\log_2 M$ 比特。
比特率 (bps)	每秒传送的比特数，记作 R_b ，单位 bit/s。
波特率 (Baud)	每秒传送的码元数，记作 R_s ，单位 baud。关系式： $R_b = R_s \cdot \log_2 M$ 。常考与比特率的区别。
频带/带宽 (Hz)	物理意义的“带宽”= 可用频率范围宽度，单位 Hz。注意与网络口语里的“带宽 = 可用速率 (bps)”不是一个量（易混）。
基带/带通信	基带：数字基带信号直接在介质上传输（如以太网双绞线）。带通：把基带调制到载波后在通带上传输（如无线/光纤长距）。
信道	信号通过的物理路径，受噪声/衰减/失真/串扰影响。相关指标：SNR、BER、带宽、时延。
误码率 (BER)	错误比特数/总比特数。受调制方式、信道噪声、编码增益影响。
信噪比 (SNR)	$SNR = \frac{S}{N}$ ； $SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$ 。3 dB \approx 功率 $\times 2$ ，10 dB $\approx \times 10$ （速算常考）。

2.1.1.0.2 三组高频易混淆

名词	定义	记忆/考点
比特率 R_b vs 波特率 R_s	R_b 是比特/秒； R_s 是码元/秒	$R_b = R_s \cdot \log_2 M$ ；当 $M = 2$ 时二元码元， $R_b = R_s$ 。
带宽 (Hz) vs “带宽” (bps)	物理带宽 = 频率范围；网络口语带宽 = 传输速率	考题常设陷阱，问“带宽增加一定能提升速率？”需结合奈奎斯特/香农条件。
基带传输 vs 带通传输	基带：不调载波；带通：经调制在通带上传输	有线短距多用基带（以太网），无线/长距多用带通。

2.1.1.0.3 传输方式与工作方式

- 按方向性：单工（A→B）、半双工（A B 但同一时刻单向）、全双工（A B 同时双向）。
- 按并发度：串行（逐位）vs 并行（多位同时，短距如主板总线）。
- 按定时：异步（字符为单位，起止位，简单/开销大/容错强）vs 同步（帧为单位，共享时钟，效率高）。



2.1.1.0.4 信道损伤的三大来源

- **衰减 Attenuation:** 随距离/频率增大而增大，常用 dB 表示。 $A_{dB} = 10 \log_{10}(P_{\lambda}/P_{\text{出}})$ ，可叠加（方便链路预算）。
- **噪声 Noise:** 热噪声、串扰、脉冲噪声等，直接降低 SNR，提高 BER。
- **失真 Distortion:** 多径、频率选择性衰落导致波形展宽、码间串扰（ISI）。

2.1.1.0.5 小结与前导

- 通信性能受频带 (Hz)、SNR、码间串扰共同制约。下一小节将分开讨论信号表示与传输特性；随后用奈奎斯特定理（无噪声限速）与香农定理（有噪声容量）给出理论上限。
- 牢记三个公式： $R_b = R_s \log_2 M$ ； $\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10}(S/N)$ ；dB 可直接相加（功率比相乘）。

408 考试提示

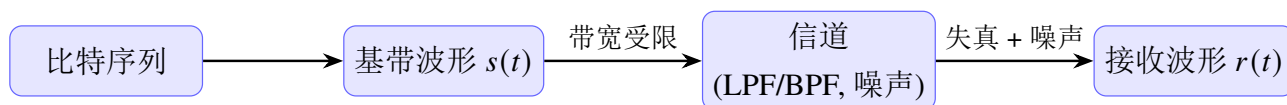
- 概念选择题高频：比特率/波特率/码元/带宽 (Hz) vs 带宽 (bps)/基带与带通/异步与同步。
- 速算题： M 元码、已知波特率求比特率；dB 级联增益/损耗；给定 SNR 估容量（香农）或无噪声限速（奈奎斯特）。
- 易错点：把“带宽 (Hz)”当“速率 (bps)”；把“波特 = 比特/秒”混淆在 $M \neq 2$ 的情形。

2.1.2 信号的传输

信号在信道中传输会受到带宽限制、噪声、频率选择性衰减与时延失真的共同影响。理解时域—频域两个视角，有助于掌握“为什么方波变圆了、为什么会码间串扰（ISI）”。

2.1.2.0.1 时域/频域双视角

- **时域:** 观测 $s(t)$ 的波形。带宽受限会“抹平”陡峭边沿，脉冲展宽导致相邻码元互相影响（ISI）。
- **频域:** 用傅里叶展开把信号分解为不同频率的正弦叠加；信道像一个滤波器（低通 LPF/带通 BPF），削减通带外的频率分量。



2.1.2.0.2 三类主要传输损伤

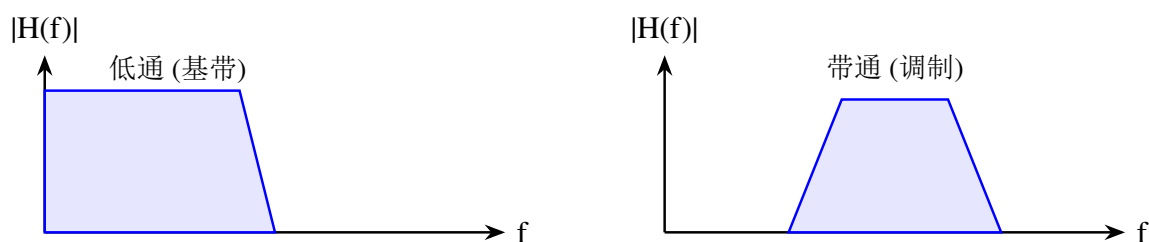
类型	现象/原因	影响与缓解
衰减 (Attenuation)	功率随距离/频率下降；介质损耗	降低幅度与 SNR；用中继/放大、选更优介质；用 dB 做链路预算。
噪声 (Noise)	热噪声、串扰、脉冲噪声	提高误码率 BER；采用编码增益、滤波、屏蔽与合理布线。
失真 (Distortion)	频率选择性衰减、群时延不平坦	波形展宽、码间串扰 ISI；均衡、成形滤波、提高采样判决裕度（眼图张开）。

2.1.2.0.3 衰减与分贝 (dB) 快记

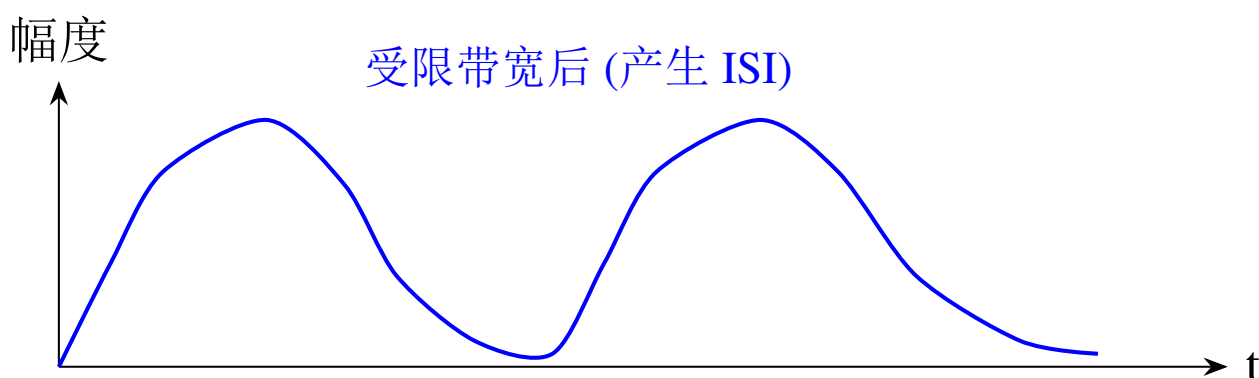
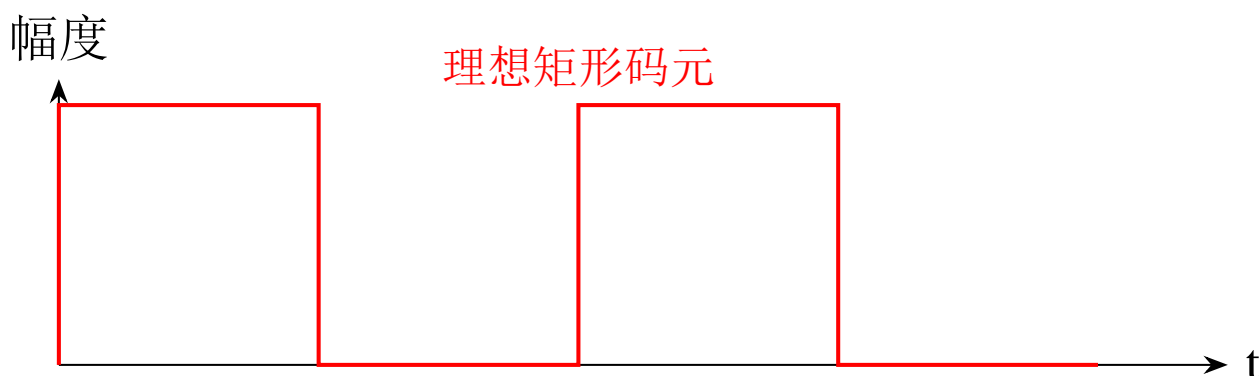
- 功率比与分贝： $G_{dB} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_{\text{出}}}{P_{\lambda}}\right)$ ；损耗为负值。可直接相加表示级联段总增益/损耗。
- 近似换算：3 dB \approx 功率 $\times 2$ ，10 dB $\approx \times 10$ ；-3 dB $\approx \times 1/2$ 。

2.1.2.0.4 低通信道与带通信道

- 低通：包含直流分量，适合基带传输（如以太网双绞线的短距场景）。
- 带通：只允许一段频带通过，需调制到载波后传输（无线、电缆长距、光纤等）。



2.1.2.0.5 ISI 直观理解 理想矩形码元含有高频分量，受限带宽后边沿变缓、脉冲展宽，超出一个码元时间进入相邻时隙，造成码间串扰。解决思路：**成形滤波**（受控带宽内成形，例如升余弦）、均衡补偿信道、提高采样判决裕度。

**408 考试提示**

- 概念辨析：低通 = 可基带；带通 = 需调制；时域失真 \leftrightarrow 频域带宽受限。
- 计算速记：dB 可相加；3 dB \approx 2 倍功率，-3 dB \approx 1/2；利用 SNR 与下一节容量/限速公式联动。
- 现象判断：边沿被抹平、多径展宽 \rightarrow ISI；对策：成形、均衡、判决时钟优化。

2.1.3 信道容量

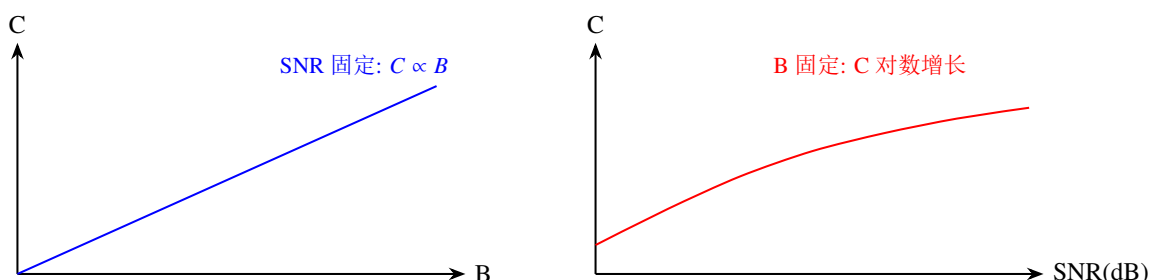
信道容量 (Channel Capacity) 指在给定带宽 B 与噪声条件 (SNR) 下，理论上可无差错传输的最高信息速率 (bit/s)。容量是上限：实际可达速率 \leq 容量。

2.1.3.0.1 两个核心结论（先记结论，下一小节推导）

情形	容量/限速表达式与要点
无噪声、理想低通	奈奎斯特限速： $R_b \leq R_s \log_2 M$ 且 $R_s \leq 2B$ ，故 $R_b \leq 2B \log_2 M$ ；二元 ($M=2$) 时 $R_b \leq 2B$ 。
有噪声 (高斯白噪声)	香农容量： $C = B \log_2(1 + \text{SNR})$ 。对数增长：提高 SNR 收益递减，而增大带宽是线性增长。

2.1.3.0.2 单位与换算

- 带宽 B 用 Hz；容量/速率用 bit/s (kbps= 10^3 , Mbps= 10^6)。
- $\text{SNR}_{\text{linear}} = \frac{S}{N}$ ； $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(S/N)$ ；二者换算： $\text{SNR}_{\text{linear}} = 10^{\text{SNR}_{\text{dB}}/10}$ 。
- 3 dB \approx 功率 $\times 2$ (SNR 乘 2)，10 dB $\approx \times 10$ 。香农公式中代入线性 SNR。



2.1.3.0.3 速算例题

例 1. 已知 $B = 1 \text{ MHz}$ ， $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 。求香农容量。

$$\text{SNR}_{\text{linear}} = 10^{20/10} = 100, \quad C = B \log_2(1 + 100) \approx 10^6 \times 6.658 = 6.66 \text{ Mbps}.$$

例 2. 已知电话信道 $B = 3 \text{ kHz}$ ，二元传输 ($M=2$)。若无噪声，奈奎斯特限速 $R_b \leq 2B = 6 \text{ kbps}$ 。若 $\text{SNR} = 30 \text{ dB}$ ，香农容量 $C = 3000 \log_2(1 + 1000) \approx 29.9 \text{ kbps}$ 。

例 3. 若希望 $C \geq 10 \text{ Mbps}$ ，在 $B = 2 \text{ MHz}$ 下需多大 SNR？

$$10 \times 10^6 = 2 \times 10^6 \log_2(1 + \text{SNR}) \Rightarrow \log_2(1 + \text{SNR}) = 5, \quad \text{SNR} = 31 \Rightarrow \text{SNR}_{\text{dB}} \approx 10 \log_{10} 31 \approx 14.9 \text{ dB}.$$

408 考试提示

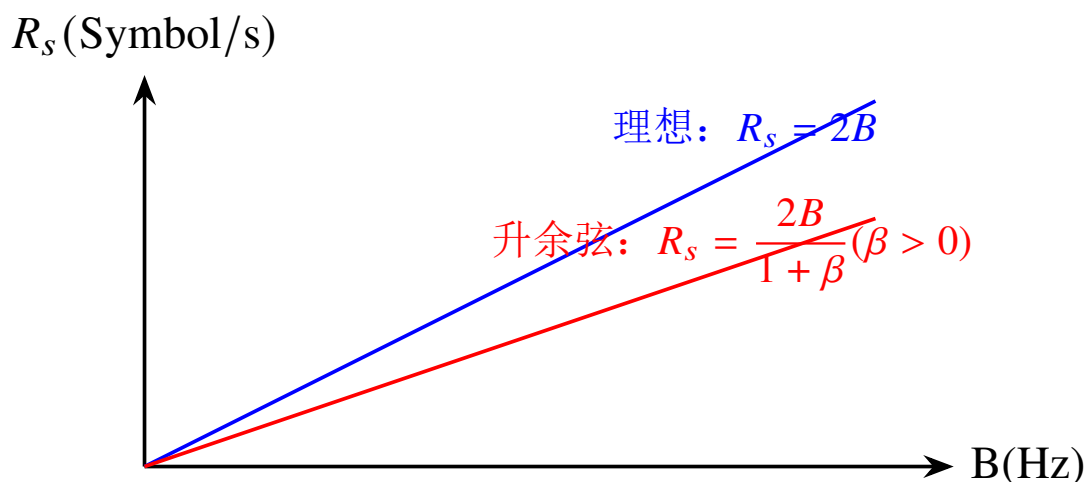
- 先分情形：无噪声看奈奎斯特 ($R_s \leq 2B$, $R_b = R_s \log_2 M$)；有噪声看香农容量 ($C = B \log_2(1 + \text{SNR})$)。
- 换算谨慎：SNR 若给 dB，进香农公式前先转线性值；结果单位留意 bit/s \rightarrow kbps/Mbps。
- 增长对比：增大 B 线性提速；提高 SNR 为对数收益，题目常让你判断“该加带宽还是加功率”。
- 本小节给出结论与速算，详细推导放到“奈奎斯特定理和香农定理”。

2.1.4 奈奎斯特定理和香农定理

本小节给出两个“上限”的来龙去脉：无噪声条件下的奈奎斯特限速与有噪声下的香农容量，并指出常见混淆点。

2.1.4.0.1 奈奎斯特（无噪声、零 ISI 条件）

- 对理想低通信道（带宽 $B \text{ Hz}$ ），若采用满足奈奎斯特零 ISI 准则的成形（理想 sinc 或升余弦族），可实现符号率 $R_s \leq 2B$ （采样定理同源：带限 B 的信号以 $2B$ 采样可复原）。
- 若每个码元承载 $\log_2 M \text{ bit}$ ，则比特率 $R_b \leq 2B \log_2 M$ ； $M=2$ 时 $R_b \leq 2B$ 。
- 实际常用升余弦成形，带宽为 $B = \frac{1+\beta}{2} R_s$ （滚降系数 $\beta \in [0, 1]$ ），于是 $R_s \leq \frac{2B}{1+\beta}$ （拓展了解，考试以理想式为主）。



2.1.4.0.2 香农（有噪声、高斯白噪声信道）

- 香农容量: $C = B \log_2(1 + \text{SNR})$ ，为无差错通信可达的极限（允许使用任意长的纠错码）。
- 谱效率 $\eta = \frac{C}{B} = \log_2(1 + \text{SNR})$ (bit/s/Hz)。低 SNR 下 $\eta \approx \frac{\text{SNR}}{\ln 2}$ ；高 SNR 下近似 $\eta \approx \log_2(\text{SNR})$ （对数增长）。
- 启示：堆功率（提 SNR）收益递减；加带宽是线性提升，但受物理/法规限制。

2.1.4.0.3 二者关系与易混点

维度	奈奎斯特（无噪声）	香农（有噪声）
适用	理想低通、零 ISI 可达	高斯白噪声信道容量上限
适用	理想低通、零 ISI 可达	高斯白噪声信道容量上限
表达	$R_b \leq 2B \log_2 M$	$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$
含噪声?	不考虑噪声/误码概率	显式考虑噪声（线性 SNR）
设计含义	决定码元率与成形带宽的下限关系	决定可达速率与编码增益的上限
常见混淆	把“奈奎斯特”当采样公式或把 $2B$ 当容量	用 dB 值直接代 SNR（漏了线性化）

2.1.4.0.4 小例题

例 1. $B = 200 \text{ kHz}$ ，理想无噪声， $M = 8$ （每码元 3 bit）。求最大比特率。

$$R_b \leq 2B \log_2 M = 2 \times 2 \times 10^5 \times 3 = 1.2 \text{ Mbps}.$$

例 2. 目标谱效率 $\eta = 4 \text{ bit/s/Hz}$ ，问最低 SNR(dB)?

$$\eta = \log_2(1 + \text{SNR}) = 4 \Rightarrow \text{SNR} = 2^4 - 1 = 15, \text{SNR}_{\text{dB}} \approx 10 \log_{10} 15 \approx 11.76 \text{ dB}.$$

例 3. $B = 3 \text{ MHz}$ 、 $\text{SNR} = 18 \text{ dB}$ 。香农容量？若理想无噪声且 $M = 16$ 时奈奎斯特限速？

$$\text{SNR} = 10^{1.8} \approx 63.1, C = 3 \times 10^6 \log_2(1 + 63.1) \approx 3 \times 10^6 \times 6.01 = 18.0 \text{ Mbps}; \text{奈奎斯特: } R_b \leq 2B \log_2 M = 2 \times 3 \times 10^6 \times 4 = 24 \text{ Mbps} \text{ (但实际有噪声时达不到)}.$$

408 考试提示

- 三步走：先分情形（无/有噪声）→ 统一单位（Hz、bit/s）→ dB 先转线性再代公式。
- 谱效率快算： $\eta = \log_2(1 + \text{SNR})$ ；给 η 求 SNR 用 $\text{SNR} = 2^\eta - 1$ ，再转 dB。
- 常设陷阱：把 $2B$ 当容量；把 dB 直接代入香农；忘记 M 元导致 $\log_2 M$ 。
- 工程启示：若容量受限且 SNR 提升代价大，优先拓展带宽/提高频谱利用或采用信道编码提升靠近香农极限的效率。

2.2 传输介质

2.2.1 有线传输介质

2.2.1.1 双绞线

双绞线由两根绝缘铜线按一定绞距缠绕构成，利用自互相抵消降低电磁辐射与串扰。分为非屏蔽（UTP）与屏蔽（STP/FTP）。以太网常见 RJ-45 接头，支持 PoE 供电。

类别	额定带宽 (信号)	典型速率/以太网	典型距离
Cat5e	100 MHz	1GBASE-T(1 Gbps)	100 m（水平链路）
Cat6	250 MHz	10GBASE-T 可达 55 m；1 Gbps 100 m	55/100 m
Cat6a	500 MHz	10GBASE-T(10 Gbps)	100 m
Cat7/7a	≥ 600/1000 MHz（屏蔽）	10G/万兆以上（视标准）	100 m
Cat8	≤ 2000 MHz（屏蔽）	25G/40GBASE-T（数据中心）	30 m

要点小结：成本低、施工方便，短距接入场景通用；高频衰减与串扰限制了距离与速率；屏蔽可改善抗干扰但施工与接地要求更高。

2.2.1.2 同轴电缆

同轴由内导体—绝缘层—屏蔽层—外护套构成，50Ω 多用于数据/无线电，75Ω 多用于 CATV。屏蔽效果好，频段高、距离较 UTP 更长。

类型/阻抗	典型应用	特点
50Ω（RG-58/213 等）	旧以太网 10BASE2/5、射频馈线	驻波小、功率承载较高，历史以太网 185 m/500 m；现多用于射频连接。
75Ω（RG-6 等）	有线电视、Cable Modem(DOCSIS)	衰减低、视频/宽带接入；分支/连接器质量影响回传与上行。

要点小结：抗干扰强、带宽较高，但较粗硬、施工成本高；在 LAN 中已被双绞线/光纤替代，接入网/射频仍常见。

2.2.1.3 光纤

光纤以光脉冲在玻璃/塑料纤芯中反射/折射传输，带宽极高、损耗极低、抗电磁干扰强。分单模 (SMF) 与多模 (MMF)。

类型	参数	典型距离	典型应用
多模 MMF(OM3/OM4)	芯径 50/62.5 μm；850/1300 nm	百米到数百米（10G 常见 300~550 m）	机房/园区短距互联
单模 SMF	芯径 9 μm；1310/1550 nm	十公里到百公里（中继/放大可更远）	城域/骨干/长距

要点小结：速率从千兆到 100G/400G 乃至更高；WDM（CWDM/DWDM）提升频谱利用；缺点是成本、熔接/端接工艺要求与部署难度较高。

2.2.2 无线传输介质

2.2.2.1 无线电波

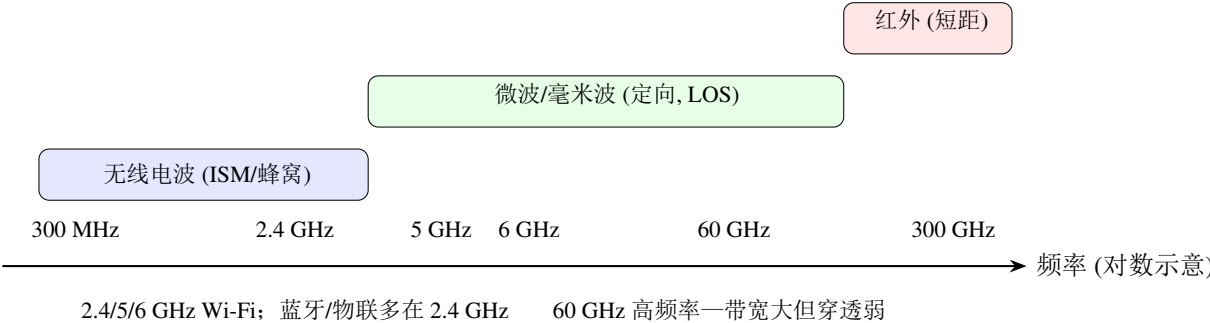
无线电波常用于 **Wi-Fi(2.4/5/6 GHz)**、蜂窝、蓝牙等，**绕射/反射能力较强**，**穿透墙体能力**优于更高频的微波/毫米波，但易受同频干扰。

2.2.2.2 微波

微波（SHF/毫米波段）频率高、带宽大，适合**点对点回传/卫星通信**。**视距 (LOS)** 要求强，对遮挡/雨衰敏感；定向天线增益高、链路预算严格。

2.2.2.3 红外线

红外线波长更短，**无法穿墙**、多用于室内**短距直视通信**或遥控，抗电磁干扰强，但受遮挡/阳光影响大。



介质	优势	局限/应用
无线电波	穿透较好、部署便捷、终端普及	易受同频干扰、共享介质碰撞；常见于 Wi-Fi/蜂窝/蓝牙
微波/毫米波	频谱宽、容量大、定向强、保密性好	视距要求、对遮挡/雨衰敏感；用于微波回传、固定无线接入、卫星
红外	抗电磁干扰、短距直视安全性高	无法穿墙、易受强光影响；用于遥控/室内短距链路

2.2.2.3.1 综合对比（选型速查）

介质	带宽级别	典型速率	典型距离	抗干扰	成本
双绞线	中	1G/10G	100 m	中	低
同轴	中-高	10M/百兆/接入宽带	100 m-公里	高	中
光纤	极高	10G/40G/100G+	公里-百公里	极高	中-高
无线电波	中	十兆-千兆（视制式）	室内/小区级	低-中	低
微波/毫米波	高	百兆-多千兆	公里级（视 LOS）	中-高	中
红外	低-中	兆级-十兆	室内短距	高（EMI）	低

408 考试提示

- 识记型：**UTP vs STP**、**Cat 类别与速率/距离**、**SMF vs MMF**（芯径/波长/距离）。
- 判断型：场景选型——**长距/抗干扰**优先**光纤**；**短距/低成本**优先**双绞线**；**无布线**用**无线**。
- 易错点：把“同轴/光纤带宽高就一定低成本”混淆；忽视**屏蔽接地**对 **STP** 的要求；**SNR** 与容量关系需回连香农公式。

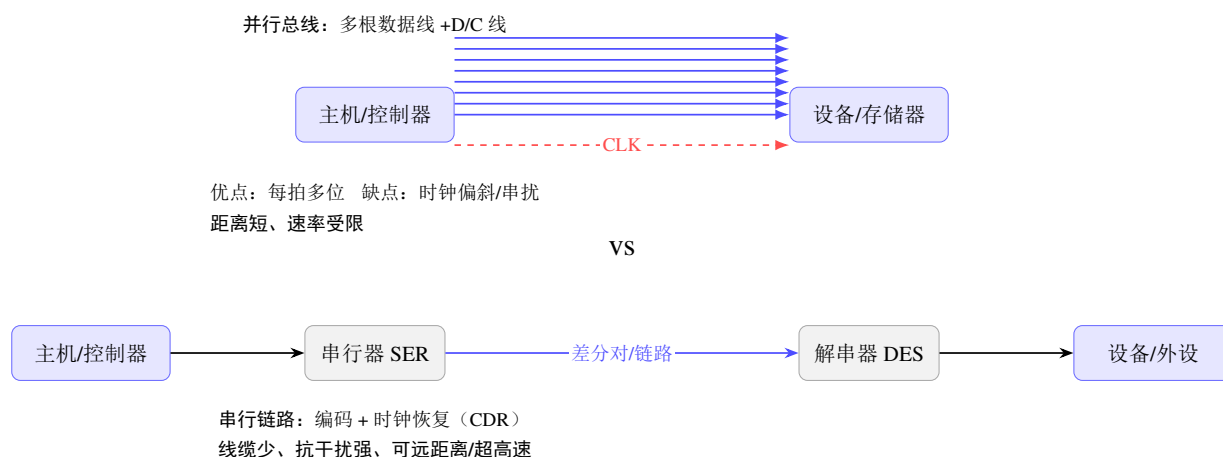
2.3 传输方式

2.3.1 串行传输和并行传输

串行与并行是按位并发度对数据在物理链路上的组织方式划分：

- **串行传输**：在一对导线/一条链路上逐位依次发送，比特沿时间轴排队。典型实现配合**编码 + 时钟恢复**（如 8b/10b、64b/66b 等）与**差分传输**，以获得**高抗干扰、远距离、超高速能力（Gbps+）**。
- **并行传输**：通过多条数据线同时并发发送多个比特（如 8 位/16 位/32 位总线），常配合一根或多根**时钟线**。受**时钟偏斜（clock skew）**和**串扰**影响，**距离短、频率受限**，适合**板级/背板/机内短距高并发**。

2.3.1.0.1 直观对照图



2.3.1.0.2 优缺点与应用对比

维度	串行	并行
线路与连接件	1 对/少数对（常用差分对），接头小、布线简单	多根数据线 + 时钟/控制线，接头宽、布线复杂
时钟与同步	依赖 编码自同步 + 时钟恢复（CDR） ，抖动容忍设计重要	需 共享时钟 ，受 时钟偏斜 影响，需等长/校准
速率与距离	易达 高频/长距 （Gbps、米-百米/公里，视介质）	适合 短距/机内/板级 ，频率受限，长度随位宽增加更受限
抗干扰/EMI	差分 + 编码， 抗干扰强、EMI 低	多线并行， 串扰与 EMI 较明显
成本与扩展	线缆/针脚少， 成本低、可多 lane 聚合 （x4/x8/x16）	引脚/线缆多，扩展代价高
典型接口	USB 2/3/4, PCIe, SATA, HDMI/DP, Ethernet, 串口（UART/RS-232/485）	内存总线（DDR 并非传统并口但属多线并发） 早期 IDE/并口打印机、FPGA/背板并行总线

2.3.1.0.3 考试提示

- **记忆法**：并行靠“多线同拍”，受偏斜/串扰困扰；串行靠“**编码 + CDR**”，远距/高速更强。
- **易混点**：并行不是一定更快——当频率提升受限时，**高速串行 + 多 Lane** 往往胜出（如 PCI→PCIe）。
- **场景选择**：机内短距高并发（如 CPU-内存）偏并行；板间/机间/外设长距首选串行。

2.3.2 同步传输和异步传输

同步与异步描述的是**时钟配合与定界方式**：

- **异步传输 (Asynchronous)**: 发送端与接收端各自独立时钟, 以起始位 (**Start**) / 停止位 (**Stop**) 为字符级定界, 必要时附奇偶校验位。简单、成本低, 适合低速、间歇通信, 如 UART/RS-232/485。
- **同步传输 (Synchronous)**: 双方共享时钟或通过自同步编码 + 时钟恢复 (**CDR**) 保持同步, 帧/块级定界, 常用前导码/标志/位填充和 **FCS/CRC**。效率高、吞吐大, 用于高速、连续链路, 如以太网、HDLC/PPP、SATA、PCIe。

2.3.2.0.1 示意图 (字段级对比)

异步 (字节定界, 起始/停止)

Start	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Parity?	Stop
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	---------	------

8N1 效率示例: $\frac{8}{8+1+1} = 80\%$

同步 (帧定界, 前导/标志 + FCS)

Sync/Preamble	Payload/Frame Data	FCS/CRC
---------------	--------------------	---------

以太网: 7B 0x55 前导 + 1B 0xD5 SFD; HDLC: 0x7E 标志 + 位填充

2.3.2.0.2 对比表

维度	异步传输	同步传输
定界与粒度	字符/字节为单位, 起始/停止位定界, 可选奇偶校验	帧/块为单位, 前导/标志 + 位填充, 帧尾常有 FCS/CRC
时钟与同步	无共享时钟, 靠起始位边沿临时校准采样点	共享时钟或自同步编码 + CDR 保持全程同步
开销与效率	每字节 2-3 位冗余 (起停/校验), 速率越低影响越明显	帧级开销, 相对更高效率, 适合高速/长帧
性能与场景	低速、间歇、点对点、实现简单, 如 UART/RS-232/485	高速、连续、链路层协议丰富, 如以太网、 HDLC/PPP、SAS/SATA、PCIe
鲁棒与实现	容忍时钟漂移较大但吞吐受限; 实现简单	对抖动/抖动容限要求高, 需编码、时钟恢复、缓冲支持

2.3.2.0.3 408 考试提示

- 口令: 异步 “起停定字节”, 同步 “前导定帧 + FCS”; 二者对应的时钟获取方式不同。
- 速算: 8N1 有效负载效率约 ~80%; 若含奇偶校验 (8E1) 则为 $\frac{8}{11} \approx 72.7\%$ 。
- 知名实例: 以太网 7B 0x55 + 1B 0xD5; HDLC/PPP 使用 0x7E 标志与位填充。

2.3.3 单向通信双向交替通信和双向同时通信

根据发送与接收是否可以同时进行, 物理层链路可分为:

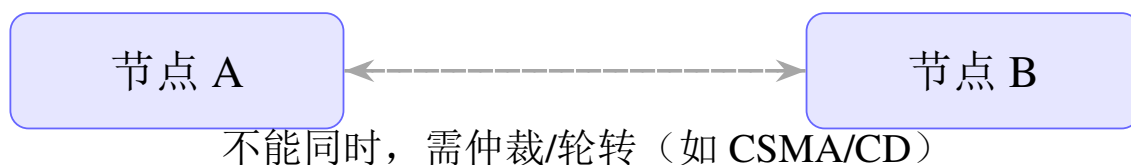
- **单向通信 (Simplex)**: 仅单方向传输, 反向无信道能力。例: 广播/电视下行、键盘 → 主机早期模型。
- **双向交替 (半双工, Half-duplex)**: 双向可达但不可同时, 需轮流占用信道。例: 对讲机、早期共享式以太网 (需 CSMA/CD)。
- **双向同时 (全双工, Full-duplex)**: 两端可同时发送与接收。例: 交换式以太网全双工、光纤双纤上下行、xDSL 回声抵消。

2.3.3.0.1 示意图

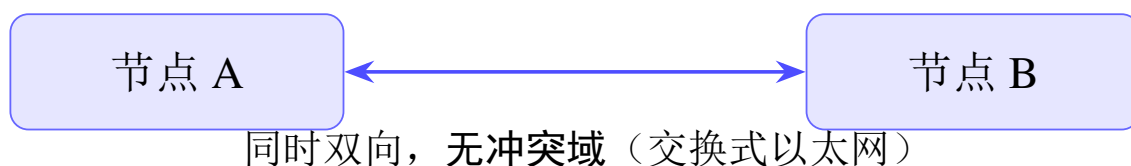
单向通信 (Simplex)



半双工 (交替)



全双工 (同时)



2.3.3.0.2 对比表

维度	单向通信	半双工	全双工
方向/是否同时	单向/不可同时	双向/不可同时（交替）	双向/可同时
冲突域与仲裁	无冲突	可能冲突，需仲裁/退避（如 CSMA/CD）	无冲突域（点到点交换式）
带宽利用	仅一向	两向共享，时分占用	两向各得一份（或回声抵消/双纤）
典型实现	广播/电视下行、传感上报单向	共享介质、早期集线器以太网、对讲机	交换式以太网、光纤双纤、xDSL、PCIe 物理链路
备注	简单，交互差	机制简单、效率受制于轮转/冲突	需要交换/回声抵消/隔离上下行

2.3.3.0.3 408 考试提示

- 以太网考点：共享介质 + 半双工才需要 CSMA/CD；交换式全双工 不再使用 CSMA/CD。
- 实现方式：全双工可通过物理分离上下行（双绞线不同线对、光纤双纤）或回声抵消实现；无线蜂窝可 FDD/TDD 区分上下行，Wi-Fi 通常半双工。
- 易错点：把“全双工 = 两倍带宽”一概而论不严谨，取决于物理层/设备能力与瓶颈。

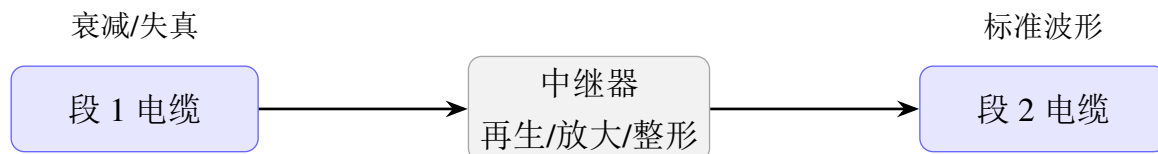
2.4 物理层设备

2.4.1 中继器

中继器 (Repeater) 工作在物理层 (L1)，对比特流进行再生整形、放大，以延长传输距离、弥补衰减与失真；其不识别帧或地址，不改变上层协议内容。

2.4.1.0.1 工作机理

- 将输入端退化的电/光信号**再生整形**为标准波形，并适当**放大**后转发到输出端。
- 双端**同速率、同编码**下工作，不能跨**不同物理层参数**（如速率、编码规则、介质类型）随意互通。
- 只在比特级处理，不缓存、不过滤、不判断地址，也不隔离冲突域。



2.4.1.0.2 应用边界与规范

- 以太网早期 **10BASE5/10BASE2/10BASE-T** 等有级联规则（“5-4-3”规则等，考试了解层面）。
- 中继器不改变冲突域规模（仍是同一冲突域），现代以太网更多使用**交换机**替代。
- 可用于光—电—光的再生中继链路；注意不同物理介质/速率需**媒体转换器**等专用设备，不是一般中继器的职责。

设备	工作层次/作用	对冲突域/广播域
中继器 Repeater	物理层：再生/整形/放大	不划分冲突域；不影响广播域
集线器 Hub	物理层：多端口中继/共享总线	同上；所有端口共享，半双工，冲突概率高
交换机 Switch	数据链路层：基于 MAC 转发	划分冲突域（端口为单位）；不划分广播域

408 考试提示

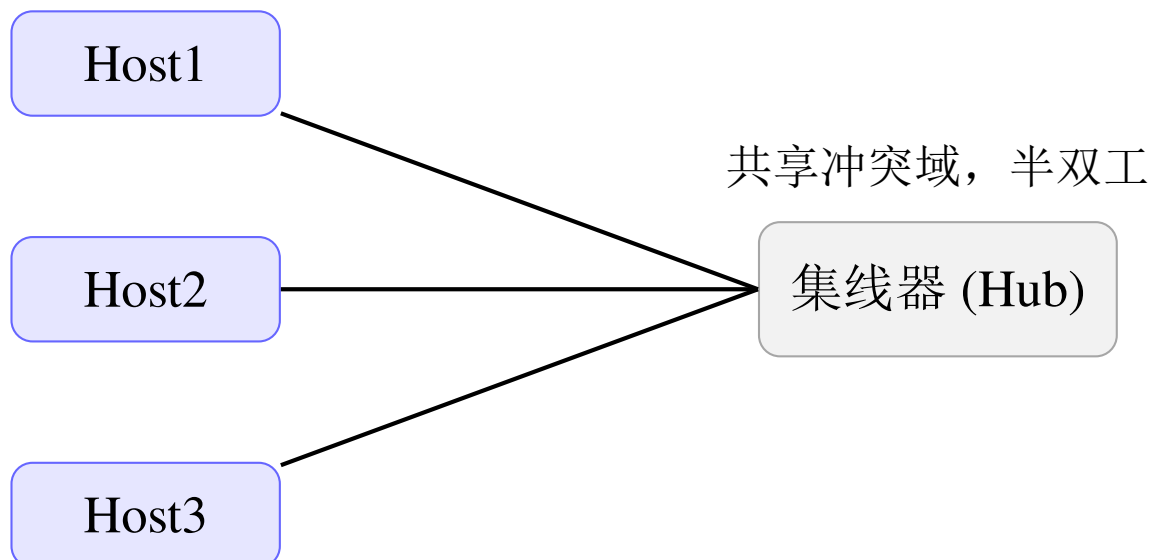
- 识记：中继器/集线器均为 **L1**，不隔离冲突域；交换机 **L2**，可划分冲突域。
- 易混：中继器**不理解帧/地址**，不可替代交换机；不同速率/编码的互联需要**媒体转换器或网桥/交换机**层面的适配。
- 正确场景：延长物理段、光电再生；错误场景：指望其**减少冲突/提高吞吐**（应使用交换机）。

2.4.2 集线器

集线器 (Hub) 本质是多端口中继器，工作在物理层 (**L1**)。其把一个端口接收到的比特流**电气再生并广播**到所有其他端口，**共享同一冲突域**，通常半双工工作。

2.4.2.0.1 工作特点

- 同一集线器上的所有端口共享同一物理总线语义：一个发，其他都能“听到”。
- 冲突域不被划分，需配合 CSMA/CD；端口越多、越繁忙，冲突概率越高、有效吞吐越低。
- 不识别 MAC，不做转发表或过滤；不隔离广播域。



2.4.2.0.2 与交换机对比（选择题高频）

属性	集线器 Hub(L1)	交换机 Switch(L2)
转发方式	比特再生 + 广播到所有端口	按 MAC 学习/转发表选择性转发
冲突域	不划分（整机一个）	端口级划分（每端口独立）
双工/速率	多为半双工/低速	支持全双工/更高速率
性能/吞吐	随端口数/负载上升而下降	线速转发、吞吐高、可扩展
应用现状	已基本被交换机替代	LAN 标配接入/汇聚

408 考试提示

- 选项辨析：看到广播到所有端口/半双工/共享冲突域基本指向“集线器”。
- 场景判断：想隔离冲突/提升吞吐应选“交换机”，不是集线器/中继器。
- 历史回顾：集线器在现代以太网已罕用，题目多在概念辨析/对比上设问。

2.5 编码与调制

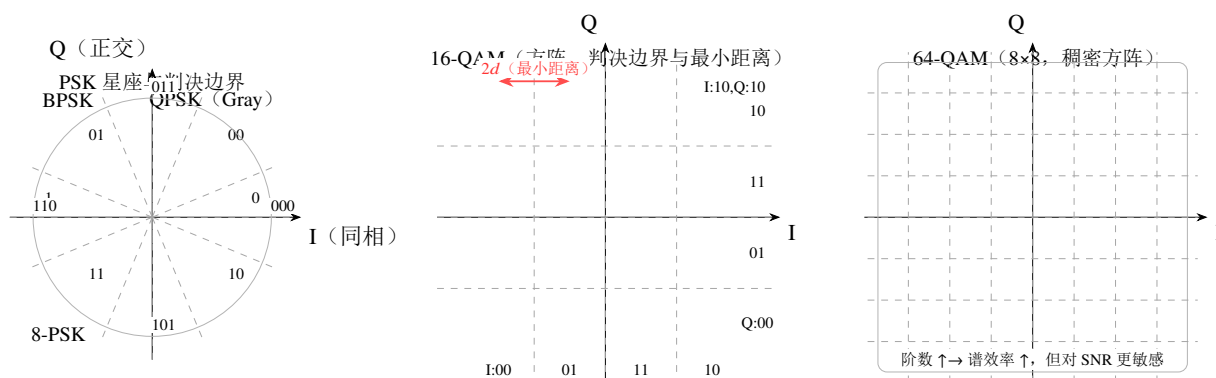
2.5.1 编码与调制的基本概念

本小节聚焦物理层中的“编码”与“调制”两件事：前者多指基带数字线码的表示方式，后者是将信息映射到模拟载波（幅度/频率/相位/矢量）上以适应带通信道。

2.5.1.0.1 核心概念速览

基带编码（线码）	将比特流直接映射为基带波形（电平/极性/过零等），典型：NRZ-L/NRZ-I、RZ、AMI、曼彻斯特、差分曼彻斯特等。
带通调制	将信息映射到载波的幅度/频率/相位，或其联合（ASK/FSK/PSK/QAM），便于在带通信道上传输（无线、长距、电缆/光纤）。
码元/符号	一次调制/编码输出的最小单位，可能承载 k 个比特。M 进制调制： $k = \log_2 M$ ；符号率 $= R_s$ （波特）。
比特率与波特率	比特率 R_b （bps），符号率 R_s （Baud）。二进制时 $R_b = R_s$ ；M 进制时 $R_b = k R_s$ ，其中 $k = \log_2 M$ 。
频谱与带宽	线码频谱与直流/高频成分相关；带通调制占用载波附近频带。带宽（Hz）受脉冲成形与滚降系数影响（如升余弦 $(1 + \alpha)R_s$ 近似）。
自同步与直流分量	自同步编码（如曼彻斯特/差分曼彻斯特）便于时钟恢复；有/无直流分量影响低通信道可否直接传（以太网常需抑制直流）。

2.5.1.0.2 星座图一瞥（PSK/QAM，含判决边界与 Gray 标注）



2.5.1.0.3 关键关系式

- **M 进制调制**：每符号携带 $k = \log_2 M$ bit, $R_b = k R_s$ ；在固定带宽与 SNR 下，增大 M 提升谱效率但误码率对噪声更敏感。
- **基带线码与带宽**：自同步编码常提升时钟恢复鲁棒性，但**频谱更宽**；抑制直流的码型利于**变压器/低通**链路传输。
- **基带 vs 带通**：低通信道可直接基带；带通信道需经调制到载波后传输。

2.5.1.0.4 两者区别与场景对比

维度	基带编码（线码）	带通调制
对象与输出	数字基带波形（电平/极性/过零）	模拟载波的幅/频/相位或矢量（I/Q）
代表方式	NRZ、RZ、AMI、曼彻斯特、差分曼彻斯特	ASK、FSK、BPSK/QPSK、M-QAM
时钟同步	依赖码型自同步与接收端时钟恢复	载波同步 + 符号定时恢复（CDR/PLL）
频谱占用	与码型相关（有无直流、高频成分）	以 f_c 为中心的通带；受成形滤波影响
常见场景	双绞线短距以太网、电气底层互连	无线/有线长距、光纤、同轴宽带接入

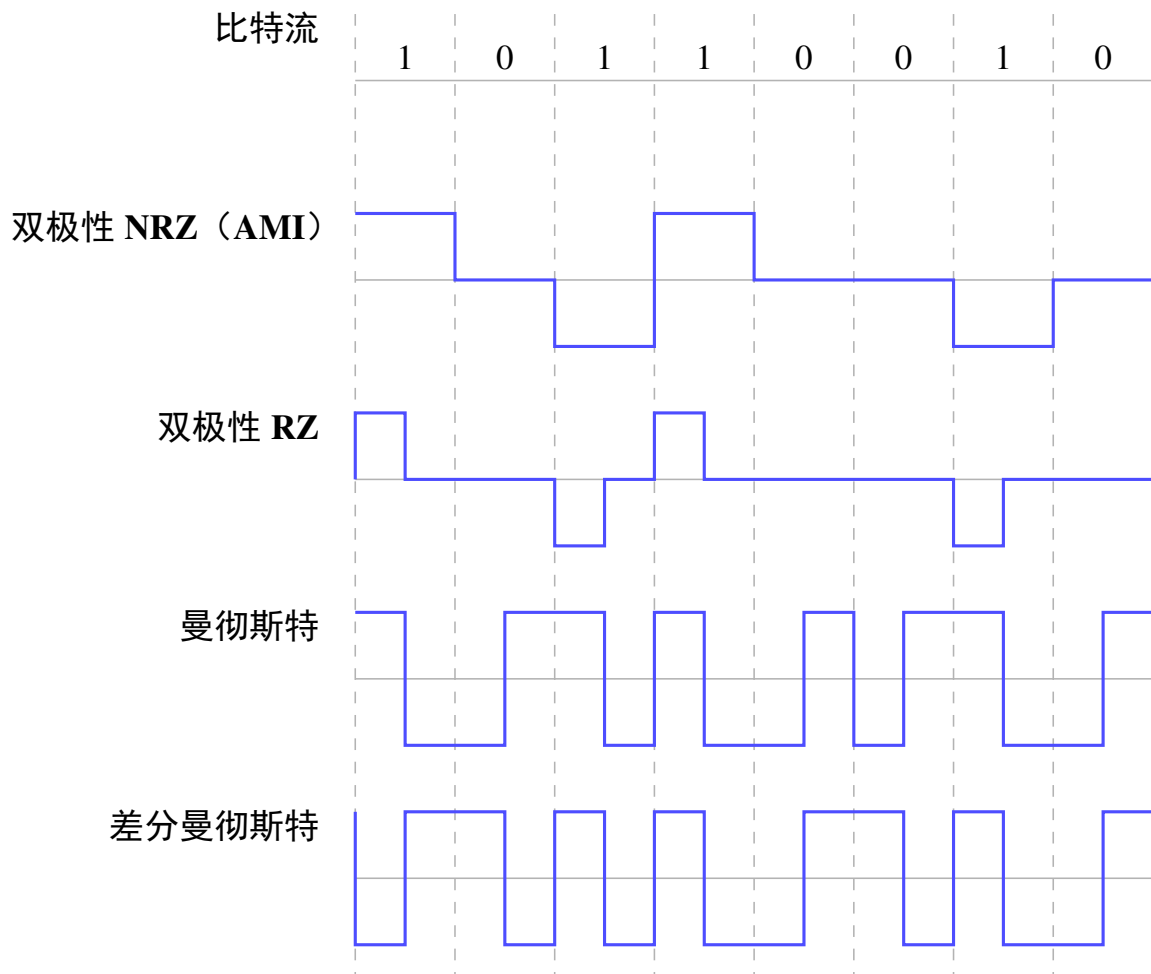
2.5.1.0.5 408 考试提示

- 辨析：比特率 (bps)、波特率 (Baud)、码元/符号、M 进制与谱效率之间的关系。
- 记忆：基带 = 线码（NRZ/曼彻斯特…）；带通 = 调制（ASK/FSK/PSK/QAM）。低通 \Rightarrow 可基带；带通 \Rightarrow 需调制。
- 场景：以太网双绞线多用基带线码；Wi-Fi/蜂窝/长距链路使用带通调制与更高阶 M-QAM。

2.5.2 数字信号的编码

数字线码是把比特流映射为基带电信号的规则。关注三点：自同步能力（便于时钟恢复）、直流分量（影响低通信道）、频谱/带宽占用（影响速率与距离）。

2.5.2.0.1 常见线码小示意



2.5.2.0.2 常见线码对比

线码	自同步	直流分量	带宽/频谱特性	常见应用
NRZ-L/NRZ-I	弱（长 0/1 易失同步）	有（取决于数据偏置）	带宽较窄，频谱含直流	早期链路、与 4B/5B/8B/10B 配合
RZ	中	较少直流	频谱比 NRZ 更宽（回到零）	早期系统
曼彻斯特	强（每比特中点必跳变）	无直流（均衡）	带宽约为 NRZ 的 2 倍	10BASE-T、RFID 等
差分曼彻斯特	强（中点必跳变）	无直流	带宽与曼彻斯特相近	令牌环等
AMI（双极性）	中（需避免长零）	直流抑制较好	频谱集中，需违规/填充避免长零	E1/T1 体系（HDB3/B8ZS 变体）

2.5.2.0.3 408 考试提示

- 自同步排序：曼彻斯特/差分曼彻斯特 > AMI > NRZ。
- 直流分量：曼彻斯特/差分曼彻斯特/双极性（AMI）无直流或被抑制，利于变压器耦合与低通链路。
- 带宽：曼彻斯特带宽约翻倍；NRZ 较窄但需码组映射（如 4B/5B、8B/10B）来保证过零密度。

2.5.2.1 曼彻斯特编码

每比特间隔中点必有一次跳变用于时钟恢复：

- 约定 1 种常见映射：1= 高到低，0= 低到高（IEEE 802.3 10BASE-T）。

- 优点：自同步强、无直流分量、实现简单；缺点：带宽约为 NRZ 的 2 倍。

2.5.2.2 差分曼彻斯特编码

规则：每个比特中点必跳变；数据位由起始边界是否跳变来表示（1= 起始跳变，0= 起始不跳变的一种常见约定）。

- 优点：抗极性反接（差分定义）、自同步强、无直流；带宽略高于 NRZ。

2.5.2.3 双极性不归零（AMI, Bipolar NRZ）

编码规则：比特 1 用交替极性的全比特宽脉冲（+V、-V 轮流出现），比特 0 为零电平（0V）。相邻“1”极性交替，称为交替标记反转（AMI）。

- 直流分量：正负对称，DC 抑制好；频谱较 NRZ 更集中，低频分量较少。
- 自同步性：较一般，长零序列会导致过零密度不足，需配合零替代/违规编码（如 HDB3（E1）、B8ZS（T1））。
- 带宽占用：与 NRZ 相近，明显小于曼彻斯特。
- 工程特性：出现同极性连续“1”可作为双极性违规进行错误/控制标记识别（也用于零替代方案）。
- 典型应用：E1/T1 干线基础线码（结合 HDB3/B8ZS）；专线/承载场景常见。

2.5.2.4 双极性归零（Bipolar RZ）

编码规则：比特 1 在半个比特时间输出 +V 或 -V（极性交替），后半比特回零；比特 0 为全比特零电平。

- 自同步性：较强，因“1”位中点必回零，过零密度高，时钟恢复更稳；长零序列仍可能影响同步。
- 直流分量：正负对称且回零，DC 分量很小，适合变压器耦合/低通链路。
- 带宽占用：脉冲变窄、回零使高频分量增加，带宽大于 AMI（NRZ）（约为其 1.5-2 倍，视成形而定）。
- 典型应用：早期载波系统、部分磁记录/专用链路；现代以太网中少用，更多用于教学与特定工程。
- 工程注意：为避免长零导致的定时退化，常配合扰码/零替代或上层帧结构保障过零密度。

2.5.3 模拟信号的调制

带通调制是把离散信息映射到模拟载波上（幅度/频率/相位或 I/Q 矢量），以适应只能通过特定频带传输的信道（无线、同轴、光纤等）。

2.5.3.0.1 带通信号的一般形式与 I/Q 正交分解 带通信号可写为

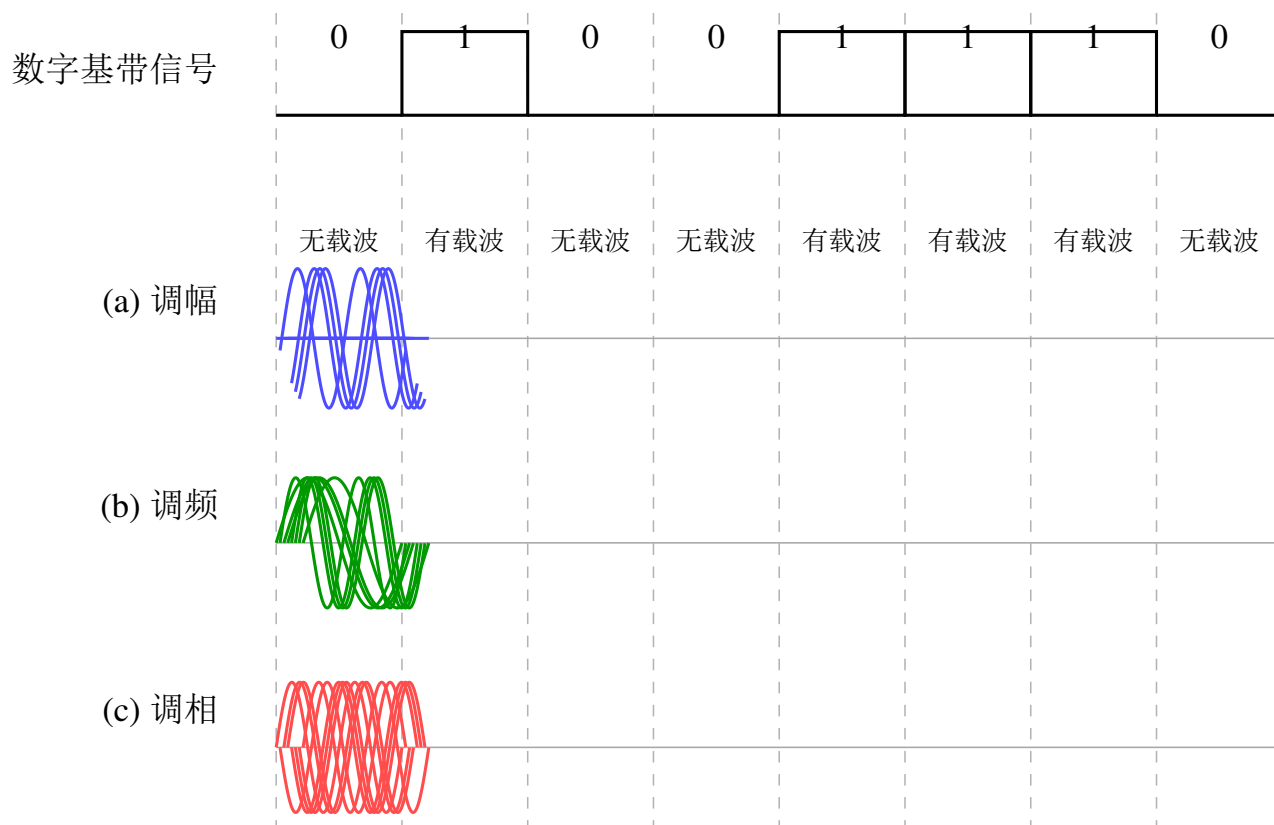
$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi(t)), \quad \text{或} \quad s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t),$$

其中 f_c 为载波频率； $A(t)$ 、 $\varphi(t)$ 或 I/Q 随符号变化。调制的本质是选择哪一维承载信息：幅度（ASK）、频率（FSK）、相位（PSK），或同时在 I/Q 二维承载（QAM）。

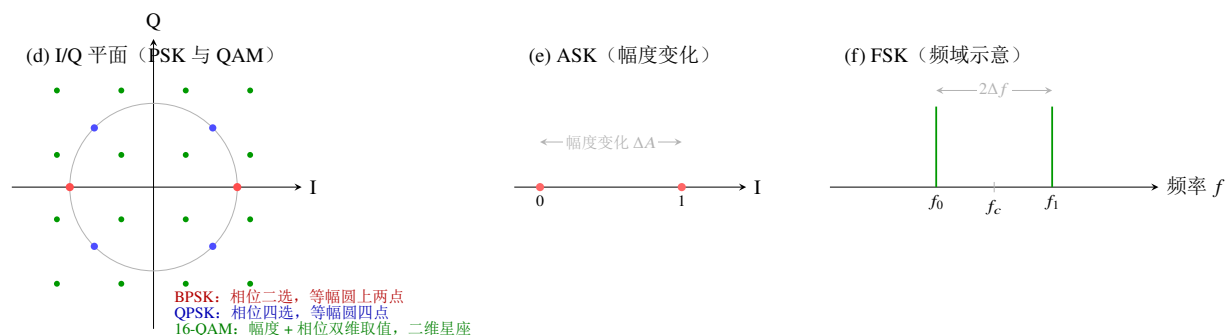
2.5.3.0.2 ASK/FSK/PSK/QAM 的定义与特点

- 二进制 ASK（开关键控，OOK）：比特 1 用较大幅度，0 用小幅度/零幅度；实现简单，但抗噪声（功率效率）差。
- 二进制 FSK：用不同载波频率表示 0/1（ $f_0 \neq f_1$ ）。非相干解调易做、抗衰落较稳，但带宽占用较大。
- PSK：用相位表示信息。BPSK 每符号 1 比特，QPSK 每符号 2 比特。相干解调下，功率效率高于 ASK/FSK（同带宽下误码率更低）。
- M-QAM：在 I/Q 平面上取 M 个离散点（方阵最常见），每符号 $k = \log_2 M$ 比特，谱效率高，但对 SNR 更敏感，阶数越高越易误码。

2.5.3.0.3 时间域小示意（与图示一比一复刻：ASK/FSK/PSK）



2.5.3.0.4 关系总览（I/Q 与频域）



2.5.3.0.5 一眼看懂关系

- 只改幅度: A

Rightarrow

ASK; 只改相位: φ

Rightarrow

PSK; 只改频率: f

Rightarrow

FSK; 同时改 I/Q (幅 + 相位): (I, Q)

Rightarrow

QAM。

- I/Q 视角: PSK 星座点在等幅圆上 (相位离散); QAM 星座点是二维网格 (幅 + 相位离散)。

- 频域视角：FSK 体现为频线位置变化（间隔 Δf ）；ASK/PSK/QAM 的主带宽主要由符号率与成形滚降系数 α 决定。

2.5.3.0.6 关键关系式（速率、带宽、谱效率）

- 每符号比特数： $k = \log_2 M$ ， $R_b = k R_s$ （ R_b 比特率， R_s 符号率）。
- 成形滤波带宽近似：升余弦成形时 $B \approx (1 + \alpha)R_s$ （ $0 \leq \alpha \leq 1$ ）。故谱效率 $\eta = \frac{R_b}{B} \approx \frac{k}{1 + \alpha}$ 。
- FSK 带宽（概略）： $B \approx 2\Delta f + (1 + \alpha)R_s$ （ Δf 为两个频率的间隔；正交 BFSK 常取 $\Delta f \approx R_s/2$ ）。
- 功率效率（定性）：相干 BPSK/QPSK > FSK（相干）> ASK； M 增大（如 16/64-QAM）谱效率升高，但对 SNR 更敏感，给定误码率所需 E_b/N_0 更高。

2.5.3.0.7 常见带通调制对比

调制	每符号比特	带宽/谱效率（近似）	接收复杂度	特点/应用
ASK (OOK)	1	$B \approx (1 + \alpha)R_s$ ， $\eta \approx 1/(1 + \alpha)$	非相干/包络检波可行	硬件简单，功率效率差；短距、低功耗链路、RFID 等
2-FSK	1	$B \approx 2\Delta f + (1 + \alpha)R_s$ ；正交取 $\Delta f \approx R_s/2$	非相干或相干	抗衰落好、频谱占用较大；低速无线、旧制式调制
BPSK/QPSK	1/2	$B \approx (1 + \alpha)R_s$ ； $\eta \approx k/(1 + \alpha)$	载波/定时同步 + 相干判决	功率效率高；QPSK 常用于 Wi-Fi/蜂窝/卫星
M-QAM (16/64...)	$\log_2 M$	$B \approx (1 + \alpha)R_s$ ； $\eta \approx k/(1 + \alpha)$	相干，且需 I/Q 增益/相位校准	谱效率高；对 SNR/线性度更敏感，常配合 Gray 编码与均衡/纠错

2.5.3.0.8 408 考试提示

- 概念辨析：基带（线码）vs 带通（调制）； R_b 、 R_s 、 k 与谱效率的关系： $R_b = kR_s$ 、 $\eta \approx k/(1 + \alpha)$ 。
- 优劣排序（定性）：功率效率 BPSK/QPSK > FSK > ASK；谱效率 QAM > QPSK > BFSK（正交）。
- 易错点：提高 M 并非“白捡容量”，同样误码率所需 E_b/N_0 会显著升高；FSK 非相干比相干通常多消耗约 ~3 dB。
- 工程常识：QAM/PSK 实际系统用成形滤波与 Gray 编码降低 ISI/误比特；无线链路需同步（载波 + 定时）与均衡/纠错协同。

2.5.4 信道复用技术

复用（Multiplexing）是在一个物理信道上同时承载多个逻辑通信的技术；按资源维度划分常见有：频分（FDM）、时分（TDM）、波分（WDM）与码分（CDM）。多址（Multiple Access）是复用思想在共享介质多用户接入上的体现，如 FDMA/TDMA/CDMA。二者核心一致但面向的层次/场景不同。

为便于一眼理解，下图以频域/时间轴/波长/码域四个视角并排示意：

2.5.4.0.1 术语对齐

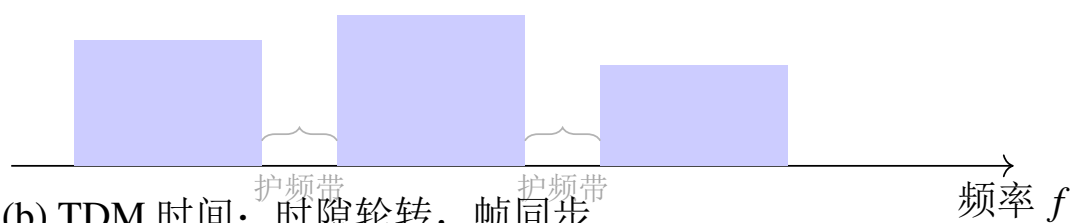
- 复用（物理/链路层常见）：FDM/TDM/WDM/CDM 对应合/分波器、合/分路器、合/分码器。
- 多址（MAC 常见）：FDMA/TDMA/CDMA —— 面向多用户共享接入的资源划分。

2.5.4.1 频分复用 FDM

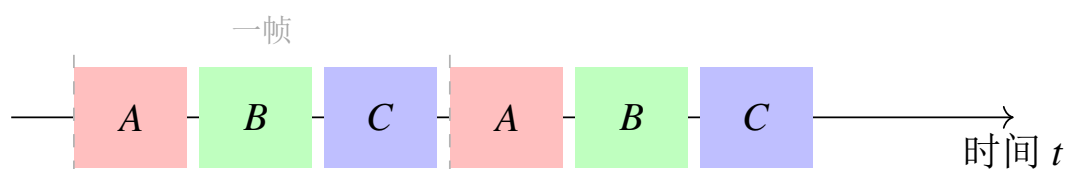
思想：把可用带宽分成若干互不重叠的子带，各路用户各占一段频谱，中间留护频带以减小串扰。典型设备为合路器/分路器；在无线/有线电视/宽带接入中广泛使用。与之在光域的对应是 WDM。

要点：

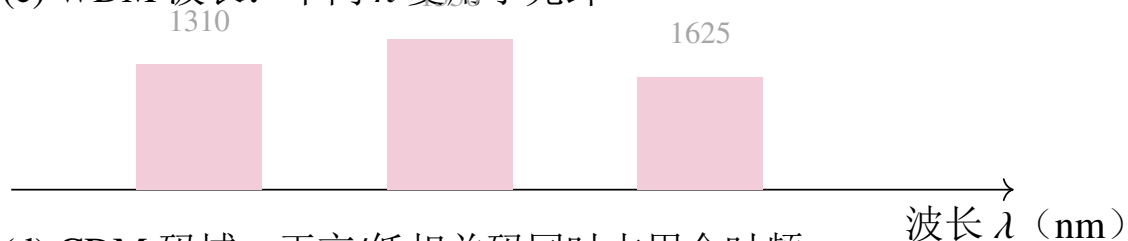
(a) FDM 频谱：互不重叠，设护频带



(b) TDM 时间：时隙轮转，帧同步



(c) WDM 波长：不同 λ 复用于光纤



(d) CDM 码域：正交/低相关码同时占用全时频

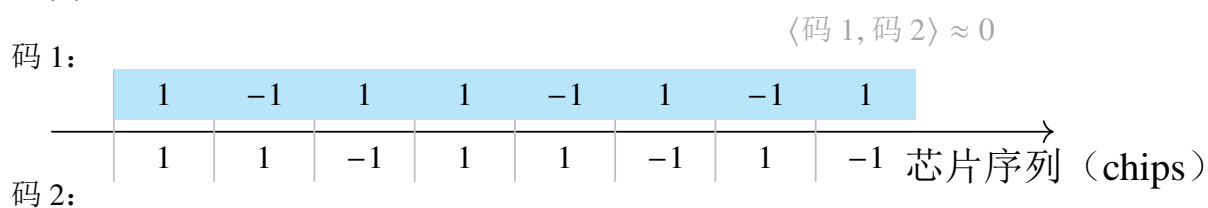


图 2.1: 信道复用四视角示意：FDM（频域）、TDM（时间）、WDM（波长）、CDM（码域）

- 近似带宽预算： $B_{\text{总}} \approx \sum_i B_i + \text{护频带总和}$ ；调制成形越好，护频带可越小。
- FDM 不需严格时钟同步，频率规划与滤波器选择性是关键。
- OFDM 是“正交子载波的 FDM”，子载波间隔 $\Delta f = 1/T_u$ ，可重叠而不互扰，并常配循环前缀对抗多径。

2.5.4.2 时分复用 TDM

思想：各路在时间上轮流占用链路。同步 TDM 按固定时隙分配（即便空载也保留）；统计复用按需求动态分配时隙，提高链路利用率。

要点：

- 线路速率 $R_{\text{线}}$ 需覆盖各源汇总与开销： $R_{\text{线}} \gtrsim \sum_i R_i + R_{\text{开销}}$ 。
- 帧结构含帧同步/时钟恢复字段；跨域时可能需缓冲与整形。
- 典型：E1/T1 复用层级，SDH/SONET 帧复用，交换机端口轮询（内核层面）。

2.5.4.3 波分复用

思想：在同一根光纤上以不同波长承载多路光信号，等价于“光域的 FDM”。分为粗波分（CWDM）与密集波分（DWDM）；前者通道间隔大、成本低，后者通道密、容量高。

要点：

- 典型窗口：1310/1550/1625 nm；DWDM 在 C/L 波段可达几十/上百波长。
- 关键器件：AWG、光合分波器、OADM/ROADM；工程上关注光功率预算、色散、非线性。

2.5.4.4 码分复用 CDM

思想：各路同时占用全时频，靠编码正交（或低相关）在接收端通过相关解扩区分。常见实现是扩频（DSSS）与跳频（FHSS）；通信制式中的 CDMA 即由此而来。

要点：

- 处理增益 $G_p = \frac{W}{R_b}$ （扩频带宽 W 对比用户比特率 R_b ）， G_p 越大越抗干扰/多径。
- 需要功率控制以缓解远近效应；码字选取常用 Walsh、m 序列/Gold（低互相关）。
- 解扩依赖精确同步（码相位/载波/定时）。

2.5.4.4.1 考试例题(CDMA 解扩计算) 两用户采用长度 4 的正交扩频码： $\mathbf{c}_1 = [+1, +1, -1, -1]$ ， $\mathbf{c}_2 = [+1, -1, +1, -1]$ ，满足 $\mathbf{c}_1 \cdot \mathbf{c}_2 = 0$ 。已知比特到幅度映射为 $1 \mapsto +1$ 、 $0 \mapsto -1$ 。本比特周期内，用户 1 发送 1，用户 2 发送 0，忽略噪声与载波/码相位偏差。

（1）问：复用后接收端芯片序列 \mathbf{r} 为何？（2）问：分别对 \mathbf{r} 与 \mathbf{c}_1 、 \mathbf{c}_2 做相关，判决两用户比特。

解：映射得到 $b_1 = +1$ 、 $b_2 = -1$ 。叠加： $\mathbf{r} = b_1 \mathbf{c}_1 + b_2 \mathbf{c}_2 = [1, 1, -1, -1] + [-1, 1, -1, 1] = [0, 2, -2, 0]$ 。

相关判决：

$$\langle \mathbf{r}, \mathbf{c}_1 \rangle = 0 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + (-2) \cdot (-1) + 0 \cdot (-1) = 4 \Rightarrow \hat{b}_1 = \text{sign}\left(\frac{1}{4} \langle \mathbf{r}, \mathbf{c}_1 \rangle\right) = +1$$

$$\langle \mathbf{r}, \mathbf{c}_2 \rangle = 0 \cdot 1 + 2 \cdot (-1) + (-2) \cdot 1 + 0 \cdot (-1) = -4 \Rightarrow \hat{b}_2 = \text{sign}\left(\frac{1}{4} \langle \mathbf{r}, \mathbf{c}_2 \rangle\right) = -1$$

故判决比特为用户 1: 1，用户 2: 0。

提示：若存在远近效应（一用户功率显著更大）或码间相关非零/同步误差，多用户间会出现泄漏干扰，需功率控制与严格同步保障判决可靠。

2.5.4.4.2 对比一览

方案	资源维度	同步/隔离机制	典型系统	优缺点（概述）
----	------	---------	------	---------

FDM	频率子带 + 护频带	频率规划 + 滤波选择性	有线电视、微波、xDSL 上下行分频	实现成熟；频谱利用受护 频带限制
TDM（同步/统计）	时间时隙/帧	帧同步、时钟恢复	E1/T1、SDH/SONET、 交换机内部调度	统计复用效率高；需严格 定时
WDM（CWDM/D- WDM）	光波长	光合分波/AWG/ROADM	城域/骨干光传输、数 据中心互联	容量极高；器件成本/色 散/非线性挑战
CDM（DSSS/FHSS）	码域（正交/低相关）	相关解扩 + 功率控制	蜂窝 CDMA、抗干扰专 用链路	抗干扰/抗窄带衰落；设计 复杂、同步严格

2.5.4.4.3 408 考试提示

- 辨析：复用 vs 多址；TDM 的同步与统计两类；WDM 属于物理层光域复用。
- 名词：护频带/护时带、帧同步、处理增益 G_p 、远近效应、循环前缀（OFDM）。
- 易错：把 OFDM 误认为“额外占带宽”——子载波正交可重叠；把 CDM 与频/时划分混淆。

第三章 数据链路层

3.1 数据链路层的功能

3.1.1 为网络层提供服务

数据链路层通过帧向网络层提供传输服务。根据是否建立连接、是否逐帧确认与重传，可归纳为三类（与教材一致）：

- 无确认的无连接服务（Best Effort）：不建立连接，不逐帧确认，不保证到达与有序，开销最小、时延低。典型：以太网（IEEE 802.3）。
- 带确认的无连接服务：不建立连接，但逐帧链路层确认/重传，仅保证单跳可靠。典型：802.11 无线局域网的 MAC ACK。
- 面向连接的服务：建立—传输—释放三个阶段，通常配合序号、确认、重传、流量控制，对每一跳提供可靠、有序的帧传输。典型：HDLC/LLC Type 2。

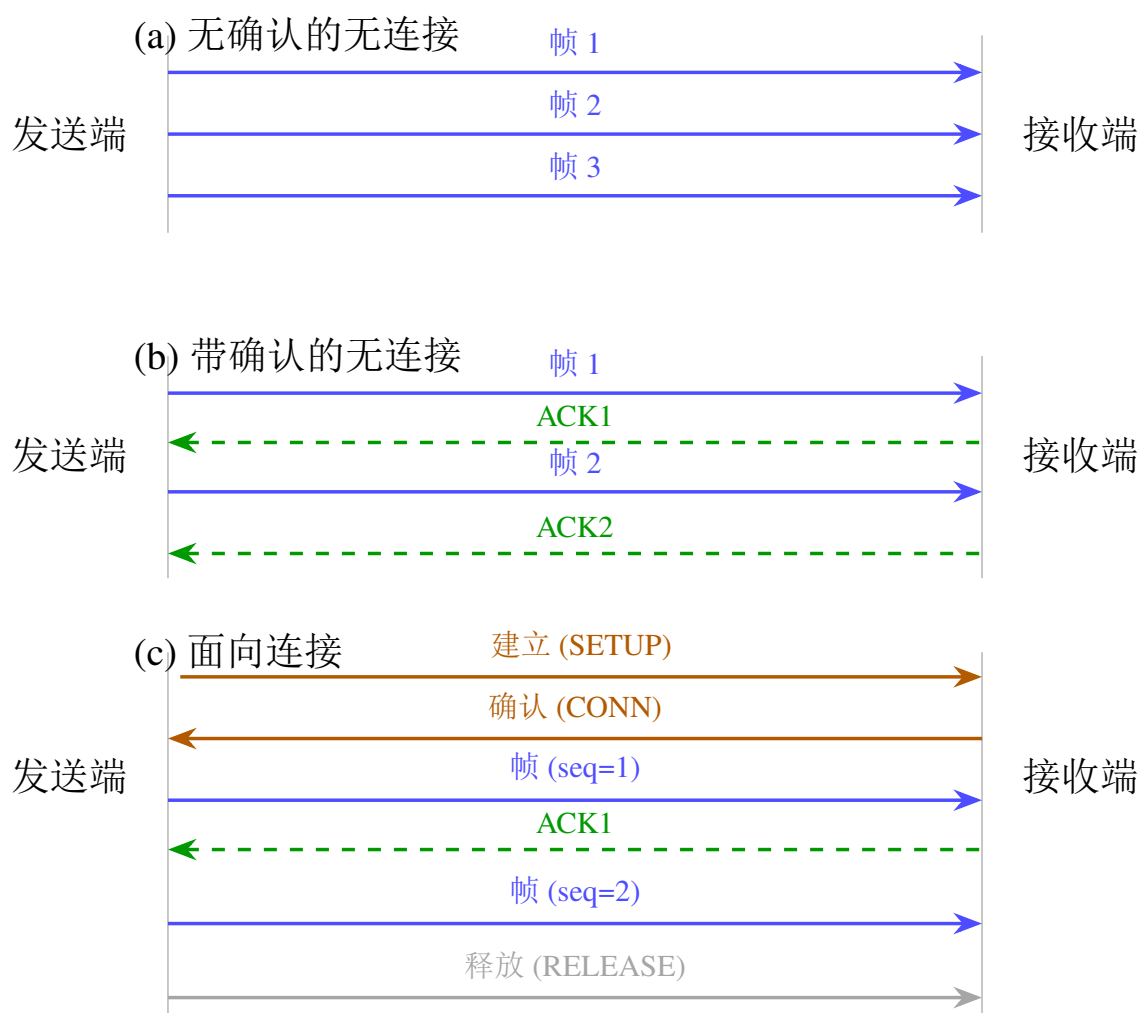


图 3.1: 链路层对网络层的三类服务：无确认无连接、带确认无连接、面向连接

3.1.1.0.1 对比与适用

服务类型	连接与确认	可靠性保证	典型场景/特点
------	-------	-------	---------

无确认无连接	无连接、无确认	不保证有序、不重传	以太网；开销小、时延低，可靠性交由高层
带确认无连接	无连接、有 ACK	单跳可靠、按帧次序	802.11；适合无线差错高链路，单跳可靠
面向连接	建连、序号确认	有序交付、流量控制	点到点可靠链路（HDLC/LLC2）；开销较大

3.1.1.0.2 408 考试提示

- 分层责任：链路层的可靠性是逐跳的；端到端可靠性由传输层保证（如 TCP）。
- 易混点：802.11 有 ACK 但仍是无连接；建连不等价于“端到端面向连接”。
- 选择策略：低差错/低时延链路倾向无连接；高差错链路可用带确认或面向连接以换取可靠性。

3.1.2 数据链路管理

3.1.3 帧同步

3.1.4 流量控制

3.1.5 差错控制

3.2 组帧

3.2.1 字符计数法

3.2.2 字符填充法

3.2.3 零比特填充法

3.2.4 违法编码法

3.3 差错控制

3.3.1 差错的产生与分类

3.3.2 检错编码

3.3.2.1 奇偶校验码

3.3.2.2 循环冗余码 CRC

3.3.3 纠错编码

3.3.3.1 海明码

3.4 流量控制与可靠传输机制

3.4.1 流量控制

3.4.2 停止-等待协议

3.4.3 后退 N 帧协议

3.4.4 选择重传协议

3.5 介质访问控制

3.5.1 介质访问控制的基本概念

3.5.2 静态划分信道

3.5.2.1 频分多路复用 FDM

3.5.2.2 时分多路复用 TDM

3.5.2.3 波分多路复用 WDM

3.5.2.4 码分多路复用 CDM

3.5.3 动态分配信道

第四章 网络层

4.1 网络层的功能

4.1.1 异构网络互连

4.1.2 路由与转发

4.1.3 拥塞控制

4.2 路由算法

4.2.1 静态路由与动态路由

4.2.2 距离向量路由算法

4.2.3 链路状态路由算法

4.2.4 层次路由

4.3 IPv4

4.3.1 IPv4 地址

4.3.1.1 IPv4 地址格式

4.3.1.2 分类编址

4.3.1.3 无分类编址 CIDR

4.3.1.4 特殊 IP 地址

4.3.2 IPv4 数据报格式

4.3.3 IPv4 数据报的分片与重组

4.4 IPv6

4.4.1 IPv6 的特点

4.4.2 IPv6 地址

4.4.3 IPv6 数据报格式

4.4.4 从 IPv4 到 IPv6 的过渡

4.5 路由协议

4.5.1 自治系统

4.5.2 域内路由协议

4.5.2.1 RIP 协议

4.5.2.2 OSPF 协议

第五章 传输层

5.1 传输层提供的服务

5.1.1 传输层的功能

5.1.2 传输层的寻址与端口

5.1.3 无连接服务与面向连接服务

5.2 UDP 协议

5.2.1 UDP 的特点

5.2.2 UDP 报文段格式

5.2.3 UDP 校验

5.3 TCP 协议

5.3.1 TCP 的特点

5.3.2 TCP 报文段格式

5.3.3 TCP 连接管理

5.3.3.1 TCP 连接建立

5.3.3.2 TCP 连接释放

5.3.3.3 TCP 有限状态机

5.3.4 TCP 可靠传输

5.3.4.1 序号与确认号

5.3.4.2 重传机制

5.3.4.3 滑动窗口

5.3.5 TCP 流量控制

5.3.6 TCP 拥塞控制

5.3.6.1 慢开始

5.3.6.2 拥塞避免

5.3.6.3 快重传

5.3.6.4 快恢复

第六章 应用层

6.1 网络应用模型

6.1.1 客户/服务器模型

6.1.2 P2P 模型

6.2 DNS 系统

6.2.1 域名系统的层次结构

6.2.2 域名解析过程

6.2.3 DNS 报文格式

6.3 FTP 协议

6.3.1 FTP 的工作原理

6.3.2 FTP 连接

6.3.3 FTP 数据传输模式

6.4 电子邮件

6.4.1 电子邮件系统组成

6.4.2 简单邮件传输协议 SMTP

6.4.3 邮局协议 POP3

6.4.4 网际邮件访问协议 IMAP

6.4.5 电子邮件格式与 MIME

6.5 万维网 WWW

6.5.1 万维网的概念与组成

6.5.2 超文本传输协议 HTTP

6.5.2.1 HTTP 的特点

6.5.2.2 HTTP 报文格式

6.5.2.3 HTTP 状态码

6.5.2.4 Cookie 与 Session

6.5.3 万维网缓存与代理服务器

第七章 网络安全基础

7.1 网络安全概述

7.1.1 网络安全的基本概念

7.1.2 网络攻击与威胁

7.1.3 网络安全策略

7.2 加密技术

7.2.1 对称加密

7.2.2 非对称加密

7.2.3 数字签名

7.2.4 报文摘要

7.3 认证技术

7.3.1 身份认证

7.3.2 数字证书

7.3.3 公钥基础设施 PKI

7.4 网络安全协议

7.4.1 IPSec

7.4.2 SSL/TLS

7.4.3 HTTPS

7.5 防火墙技术

7.5.1 防火墙的基本概念

7.5.2 防火墙的分类

7.5.3 防火墙的配置策略

第八章 408 真题考点总结

8.1 历年高频考点

8.1.1 OSI 模型与 TCP/IP 模型

8.1.2 以太网与 CSMA/CD

8.1.3 IP 地址与子网划分

8.1.4 路由算法与路由协议

8.1.5 TCP 协议特性

8.1.6 DNS 域名解析

8.1.7 HTTP 协议

8.2 重点计算题型

8.2.1 子网划分计算

8.2.2 滑动窗口计算

8.2.3 RTT 与超时重传

8.2.4 信道利用率计算

8.2.5 CRC 校验计算

8.3 应试技巧与答题策略

8.3.1 选择题技巧

8.3.2 综合应用题策略

8.3.3 时间分配建议