

# 第3章

## 网络基础

### 【带着问题学习】

1. 网络有哪些基本要素?
2. 信息交换有哪几类基本方式? 其关键区别是什么?
3. 各类通信协议是如何实现的?
4. 网络为什么要分层? 各层的目标是什么?
5. 衡量网络质量的指标有哪些?

### 【学习目标】

1. 熟悉多种分类方式下的网络名称。
2. 熟悉常用的网络拓扑结构。
3. 理解网络编址的意义、要求、常见网络的编址方法。
4. 掌握电路交换、分组交换(数据报与虚电路)的思想、措施、多角度的对比分析。
5. 掌握协议的基本概念,协议四要件。
6. 掌握网络分层模型、分层思想,OSI 与 TCP/IP 模型的异同、各层的数据单元与核心目标、数据流程。

### 【本章关键术语】

点对点通信,广播通信,全双工通信,半双工通信,信息交换,电路交换,分组交换,同步时分复用,异步时分复用,静态资源分配,动态资源分配,网络拓扑,网状网,星状网,树状网,总线型网,网络编址,协议,协议要件,分层模型,OSI 模型,TCP/IP 模型

## 3.1 网络概述



### 3.1.1 网络分类

#### 1. 为什么要分类

网络的种类很多,从不同的角度看网络,产生不同的名称,因此,区分不同的网络名称,准确把握不同名称的含义,才能在沟通交流中知道所谈的对象是什么,才能知道对方是从哪个角度在谈网络。熟悉网络的分类方法和网络名称是学习网络技术的重要基础之一。

#### 2. 如何分类

网络可以从不同角度分类,主要有如下类别。

##### 1) 按通信方式分类

(1) 点对点传输网络:数据以点到点的方式在计算机或通信设备之间传输,实现一对一的通信。

(2) 广播式传输网络:数据在共用介质中传输,实现一对多的通信。

##### 2) 按服务区域范围分类

(1) 语音电话网络按照服务区域范围分为:

① 本地电话网:本地电话网简称本地网,是指在同一长途编号区内、由若干端局(或端局与汇接局)、局间中继线、长市中继线及端局用户线所组成的自动电话网。本地网负责该区域内全部用户的网内连接,同时通过长途网完成该区域内用户与其他网络的转接。

本地网的范围一般与行政区域一致。本地网内的电话连接时,不需要字冠号码(它是拨打国际长途电话的组成号码之一,每个国家的国际字冠号码不一定相同)和长途编号(指世界各大城市所属行政区域常用电话区划号码,这些号码主要用于国内、国际长途电话接入)。

② 国内长途电话网。国内长途电话网简称国内长途网,是连接各个本地网的网络,长途网一般不直接连接用户,其作用是负责交换机之间的话务汇聚和转接。

③ 国际长途电话网。国际长途电话网简称国际长途网,是连接不同国家电话用户的网络,由此形成全球互联互通的通信网络。

(2) 计算机网络按照服务区域范围分为:

① 局域网(LAN)。一般限定在较小的区域内,小于 10km 的范围,可采用有线或无线方式连接起来。

② 城域网(MAN)。规模局限在一座城市的范围内,一般为 10~100km 的区域。

③ 广域网(WAN)。网络跨越国界、洲界,甚至全球范围。

局域网是组成其他两种类型网络的基础,广域网的典型代表是 Internet 网。

3) 按传输介质分类

有线通信:传输介质是有线介质,如双绞线、架空明线、同轴电缆、光纤等,对应的通信称为有线通信。

无线通信:传输介质是以空气作介质,用电磁波作为载体来传输数据,对应的通信称为无线通信,主要有 Wi-Fi、蓝牙、移动通信网的无线侧、微波通信、卫星通信网等。

4) 按通信的业务分类

按通信的业务类型,分为电话网、数据网、电视网等。随着综合业务的发展,这种分类越来越弱化。

5) 按网络服务的对象分类

按网络服务的对象,分为公用网、专用网。公用网是通信公司建立和经营的,向社会提供有偿的通信和信息服务的网络。专用网指某个行业、机构等独立设置的网络,仅限于特定人群使用。

6) 按终端是否能漫游分类

固定通信网:固定通信是指通信终端设备与网络设备之间主要通过电缆或光缆等线路固定连接起来,进而实现的通信,其主要特征是终端的不可移动性或有限移动性,如固定电话机、传真机、无绳电话机、计算机等电话网和数据网终端设备。固定通信网是指实现固定通信的网络;与固定通信网相对的是移动通信网。

移动通信网:移动通信网的用户终端通过无线方式接入移动基站和核心网,同时终端可以在不同基站之间、不同交换区之间移动,网络能够实时管理用户位置,并确保用户在通话或数据传输过程中无缝切换。移动通信网支持终端在范围广泛的地理区域内移动,为用户带来极大的方便性和灵活性,它一上市就得到高度认可和快速发展。

7) 按信道中传输的信号形式分类

如果信道中传输的是模拟信号,对应的通信为模拟通信;如果信道中传输的是数字

信号,那么对应的通信就为数字通信。

#### 8) 按通信工作频段分类

按通信工作频段,分为长波通信、中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信等。

#### 9) 按信号处理方式分类

信号经过网络时只向指定端口进行转接,这种网络称为交换网络;信号经过网络时向所有端口进行转接,这种网络称为广播网络。

#### 10) 按交换方式分类

交换方式采用电路交换方式的称为电路交换网络,交换方式采用分组交换方式的称为分组交换网络。PSTN网络、2G移动通信网络都是电路交换网络;4G、5G移动通信网络和计算机网络都是分组交换网络。3G核心网既有电路交换也有分组交换。

常见的网络分类如表3-1所示。

表3-1 常见的网络分类

分类方式	类型名称
通信方式	点对点通信网络、广播通信网络
通信范围	本地网、长途网;局域网、城域网、广域网;国家网、全球网等
传输介质	有线网、无线网
业务内容	固定电话网、移动电话网、数据网、电视网等
服务对象	公用网、专用网
终端性质	固定通信网络、移动通信网络
信号类型	模拟网、数字网
工作频段	长波通信、中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信
处理方式	交换网、广播网
交换方式	电路交换网络、分组交换网络

### 3.1.2 网络拓扑结构

从逻辑上看,任何网络都是由“点”“线”组成的,不同的逻辑连接关系,形成不同性质的网络。网络拓扑是指网络形状,表达逻辑上的连通性。

由点、线构成的网络虽有不同形状和结构,但都有其内部规律性,为便于理解,从逻辑结构上可归纳为几种基本结构,其他结构则由基本结构组合而成。

网络的拓扑结构主要有5种基本结构:网状型、星状、环状、总线型和树状,如图3-1所示。这5种结构为网络的基本结构形式,但在实际的大型网络中,网络的各个部分可以采用不同的拓扑结构,然后复合组成若干实用型的网络,以求得网络的合理性。拓扑结构的选择往往与传输介质的选择及介质访问控制方法紧密相关。

在选择网络拓扑结构时,应考虑的因素有下列几点:可靠性、成本、灵活性、响应时间和吞吐量。

#### 1. 网状型网络

网状型网络的主要特点是任意两个节点之间都有连接线相连。其明显的优点是可靠性高,不会因为某个连接失效而导致网络不通,因为每个节点都有多条路径达到其他

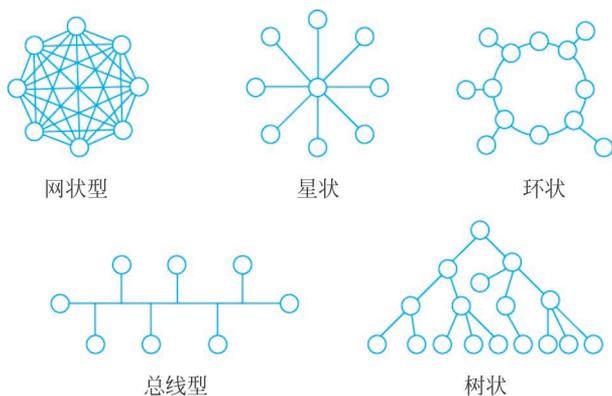


图 3-1 常见网络拓扑结构类型

节点。网状型网络的缺点是连线多,结构较复杂,建设成本高。它主要用在数量少的核心节点之间。

## 2. 星状网络

星状网络的主要特点是存在一个中央节点。它由中央节点和通过点到点链路连接到中央节点的各个节点组成。星状拓扑结构被广泛应用于网络中,由于所有节点的信息传输都必须经过中央节点来处理,因此,对中央节点的要求比较高。

星状拓扑结构有如下优点:

(1) 可靠性高。在星状拓扑结构中,每个连接只与一个设备相连,因此,单个连接的故障只影响一个设备,不会影响全网。

(2) 方便服务。中央节点和中间接线都有一批集中点,可方便地提供服务和进行网络重新配置。

(3) 故障诊断容易。如果网络中的节点或者通信介质出现问题,只会影响到与该节点或者通信介质相连的节点,不会涉及整个网络,从而比较容易判断故障的位置。

星状拓扑结构虽有许多优点,但也有缺点:增加网络新节点时,无论有多远,都需要与中央节点直接连接,布线困难且费用高;星状拓扑结构网络中的外围节点对中央节点的依赖性强,如果中央节点出现故障,则整个网络不能正常工作。

## 3. 环状网络

环状拓扑结构是一个环状闭合链路,它是由各个节点和节点之间点到点链路串连而成的一个闭合环。在环状网中,所有的通信共享一条物理通道。环状网络的主要特点是每个节点既是终端节点又是转接节点,是“人人为我、我为人人”的思路,体现的是团队精神和协作精神。

环状网络的优点是结构简单,建设成本低,既不需要像网状网络那样需要很多链路,也不需要像星状网络那样需要一个中央节点来负责整个网络的运行,但由此也带来了较多的缺点:

(1) 可靠性较差:任意一个节点出现故障,都会导致整个网络中断、瘫痪。

(2) 维护困难: 任何一个节点出了故障都会造成整个网络故障, 导致查找故障困难, 维护起来非常不便。

(3) 扩展性能差: 因为是环状结构, 决定了它的扩展性能远不如星状结构好, 如果要新添加或移动节点, 就必须中断整个网络。

#### 4. 总线型网络

总线型网络的主要特点是网络中所有的站点共享相同的数据通道。总线的概念是指所有的节点都通过一条或者一组链路进行通信。在总线型网络结构中, 当其中一个节点发送信息时, 该信息将通过总线传到与该总线相连的每一个节点, 每个节点接到信息后, 先要分析该信息的目标地址与自己的地址是否相同, 若相同, 则接收该信息; 若不相同, 则拒绝接收。总线型网络在计算机内部、计算机网络、通信网络中应用都很广泛。

总线型网络的主要优点有:

(1) 布线容易、电缆用量小。总线型网络中的节点都连接在一个公共的通信介质上, 所以需要的电缆长度短, 减少了安装费用, 易于布线和维护。

(2) 可靠性高。总线结构简单, 其中任一节点发生故障都不会造成整个网络的瘫痪, 可靠性高。

(3) 易于扩充。在总线型网络中, 如果需要增加新节点, 只需要在总线的任何点将其接入。

总线型拓扑结构虽然有许多优点, 但也有自己的局限性。

(1) 故障诊断困难。虽然总线型拓扑结构简单, 可靠性高, 但故障检测却不容易。因为具有总线型拓扑结构的网络不是集中控制, 故障检测需要在网上各个节点进行。

(2) 通信介质及总线本身的故障会导致网络瘫痪。

#### 5. 树状网络

树状网络是从星状网络和总线型网络演变而来, 像一棵倒置的树, 顶端是树根, 树根以下带分支, 每个分支还可带子分支。树根接收各站点发送的数据, 然后再发送到全网。其主要的优点是易于扩展, 故障隔离较容易; 主要缺点在于节点对根依赖性太大, 若根部发生故障, 则全网不能正常工作。

### 3.1.3 网络编址

有网络就必然要对网络中的全部设备进行编号, 用于识别各个设备。这个编号就是每个设备的网络地址, 因此网络编号也称网络编址。不同的网络有不同的编址方法和编址格式, 但同一个网络的编址方式和格式必须统一, 并形成最终的编址标准。电话网、计算机网、信令网、物联网等都有自己的编址规则。

电话网络对所有的终端(包含固定终端和移动终端)进行统一编址, 称为编号计划, 其标准是国际电信联盟 ITU-T 规定的 E. 164 标准, 其编址号码就是常见的电话号码。计算机网络对所有终端进行编址, 其编址就是 IP 地址, 编址规则是 IP 地址的编码规则。

#### 1. 编址原则

网络地址是区分网络实体的重要标志, 在对网络设备进行地址编号时, 首先必须有



视频

一个统一的编号原则,网络编号的基本原则是:

- (1) 唯一性——公众网络中每个终端号码都必须是唯一的,不能重复。
- (2) 合理性——合理安排编号计划,使号码资源运用充分。
- (3) 规律性——编号要尽量有规律,便于快速寻址。
- (4) 技术标准——编号必须依附于一定的编号计划和网络技术标准,离开编号计划和网络技术标准,单纯的号码仅仅是无意义的数字或字母。
- (5) 稳定性——编号计划应具有相对的稳定性。
- (6) 容量规划——编号计划应给各种业务的发展提供足够的号码资源。

## 2. 电话网编址实例

### 1) 电话网编码计划

PSTN 中使用的编号技术标准 E. 164 由国际电信联盟 ITU-T 规定,E. 164 编号计划规定了号码的格式和结构。

根据号码结构和用途的不同,E. 164 号码可分为用于地理区域的国际公众电号码,用于全球业务的国际公众电号码,用于网络的国际公众电号码和用于试验的国际公众电号码。其中用于地理区域的国际公众电号码就是传统电信网中常用的电话号码,它的结构如图 3-2 所示。

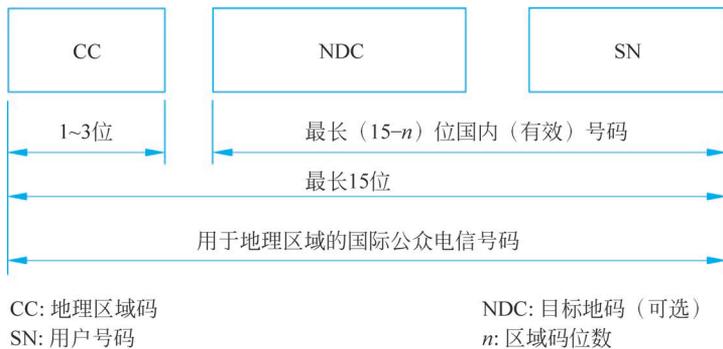


图 3-2 用于地理区域的国际公众电号码结构图

用于地理区域的国际公众电号码由两大部分组成,即地理区域码(后面简称区域码)和国内有效号码。世界各国或地区都分配一个区域码,长度为 1~3 位,例如,中国的区域码为“86”,芬兰的区域码为“358”。区域码由 ITU-T 依据相关的原则、标准和程序进行预留、分配和回收等。其相关的原则、标准和程序都在 ITU-T 的建议中规定,这些建议是需要获得 ITU-T 的所有成员国一致通过的。国内有效号码部分由拥有相应区域码的国家或地区的电信主管部门分配和管理,并确定它的结构。

根据 E. 164 的规定,国内有效号码由两部分组成,即国内目的地码(NDC)和用户号码(SN)。国内目的地码有网号、长途区号、网号+长途区号、长途区号+网号 4 种方式。我国采用了第一种和第二种方式,即

- (1) 网号+用户号码。

我国 GSM 和 CDMA 移动用户的号码均采用这种结构。

(2) 长途区号+用户号码。

我国所有固定电话网用户的号码均采用这种结构,并且是不等位编号。

根据 ITU-T 的规定,用于地理区域的国际公众电信号码的总长度最大为 15 位(1996 年 12 月 31 日前最长是 12 位)。

电话号码是用于地理区域的国际公众电信号码,编号与地理位置相关,网络选路时非常简单,根据号码就可以确定地理方位,且每一级号码需要查找的数量不大,查找很迅速。IP 地址的编址与地理位置不相关,为 IP 选路带来很大的麻烦。

下面具体介绍我国电话网的编码方案。

## 2) 电话号码编码方案

### (1) 电话号码呼叫字冠。

呼叫字冠是被叫号码的前缀,在被叫号码的最前面,各个国家或地区的字冠定义不一样。字冠的作用是用来确定此次呼叫的业务类别、业务属性、路由选择等。

我国的电话号码字冠规定是:

- “00”为国际长途全自动冠号;
- “0”为国内长途全自动冠号;
- “1”为特种业务及网间互通的首位号码;
- “2~9”为本地电话首位号码,“2~9”既是业务标识码又是用户码。其中,“200”“300”“400”“500”“600”“700”“800”为新业务号码。
- “95”“96”为其他服务接入的短号码。

### (2) 国际长途电话编号。

拨打国际电话时,拨号顺序为:国际长途字冠+区域号码+国内长途区号+市话号码(本地网号)。

例如,比利时用户拨打重庆“62463972”用户时,拨号顺序为:91+86+23+62463972(这里“+”号只是描述时的分隔符,拨打电话时不需要)。

其中,

- 91: 比利时的国际自动呼叫字冠;
- 86: 我国的区域号码;
- 23: 重庆市的长途区号;
- 62463972: 重庆市内某用户号码。

### (3) 国内长途电话网编号。

国内长途电话号码是由长途字冠、长途区号和市内电话号码组成,其编排顺序为:长途字冠+长途区号+市内电话号码。

长途字冠在全自动接续时采用“0”代表,长途区号编号方案一般采用固定号码系统,即各城市编号上都固定号码。固定号码编制又分为两种:一种是等位制,一种是不等位制。等位制即每个城市或地区长途区号位数都相等,一般适合地理范围比较小的国家,而不等位制的长途区号可以由 1 位、2 位、3 位组成。我国幅员辽阔、地理范围大,长途区号适合采用不等位制编号,其编号规定为:

- 首都北京——编号为 10。
- 省间中心及直辖市——区号为两位编号,编号为“2X”,X 为 0~9,共 10 个号。
- 省中心及地区中心——区号为 3 位,编号为“X<sub>1</sub>XX”,X<sub>1</sub> 为 3~9; X 为 0~9。

#### (4) 本地固定电话网的编号。

本地固定电话网的编号位长可根据本地电话网规划容量而定,可为 7 或 8 位号长。在编制中,首位号“0”和“1”不能用作市话用户编号(“0”用作长途自动接续字冠,“1”用作特殊业务和移动业务字冠)。

根据本地固定电话网的规划容量采用 7 位位长编号时,由局号(PQR)和用户号(ABCD)两部分组成,拨号顺序为:PQRABCD;采用 8 位位长编号时,由局号(PQRS)和用户号(ABCD)两部分组成,拨号顺序为:PQRSABCD。

号码从 7 位增加到 8 位号码时,不改变用户号 ABCD,只增加局号,具体加在哪一位(首位、第二位、第三位、第四位),要看网络发展和网络中设备的情况。

#### (5) 数字移动通信号码。

我国数字移动通信的用户号码全国统一为 11 位,格式为 1XXH<sub>1</sub>H<sub>2</sub>H<sub>3</sub>H<sub>4</sub>ABCD。其中 1XX 为移动业务接入号,也就是网号;H<sub>1</sub>H<sub>2</sub>H<sub>3</sub>H<sub>4</sub> 为移动网络归属位置寄存器(Home Location Register,HLR)的识别号,用来标识移动用户的归属地;ABCD 为移动用户号。

#### (6) 特服业务编号。

除前述国际、国内及本地网的编号方式规定之外,我国在国内长途和本地网中还设置了首位为 1 的特服业务编号,首位为 1 的号码主要是用于紧急业务号码、新业务号码、长途市话特种业务、网间互通号码、接入网号等。按国家标准规定的特服业务编号是:1XXXX,其中 X 的数字范围是 0~9。广泛使用的紧急业务号码如匪警 110、火警 119、急救中心 120、道路交通事故报警 122 等,政府公务类号码(如 12315、12345 等)及电话查号 114 等。

电话号码随着网络技术和业务发展的变化而变化,工业和信息化部会根据发展情况及时调整,详细的编号计划,可查阅工业和信息化部网站上的《电信网编号计划》。

### 3. IP 网络编址实例

IP 网络的编址方案,参见 6.2 节的介绍。



视频

## 3.2 网络性能指标

### 1. 速率

速率是计算机网络中最重要的一个性能指标,速率是指每秒传输的比特数量,称为数据率(data rate)或者比特率(bit rate)。数字通信系统中,最关心的指标就是速率。移动通信从 2 代到 5 代,人们最直观的感受就是速率的不断提高。数据通信是以二进制数字来传输的,一个二进制数称为一个比特(bit),一个比特就是二进制数字中的一个 1 或 0。速率的单位为 b/s 或 bps(比特每秒)。

### 2. 带宽

带宽(bandwidth)原来是指模拟通信系统中的频带宽度,单位是赫兹(或千赫兹、兆

赫兹、吉赫兹等),表示信道能达到的最大传输能力。

在数字系统中,依然借用这个词语来表示信道能达到的最大传输能力,但数字系统不直接用频带宽度来表示这个能力,数字系统中最直观的通信能力体现就是速率,因此带宽是指数字信道的“最高数据传输速率”。单位与速率的单位相同,为 b/s(比特每秒),Kb/s、Mb/s、Gb/s、Tb/s 等。

模拟通信中的“带宽”是频域的称谓,数字通信中的“带宽”是时域的称谓,其本质是相同的,都是表示信道能达到的最大传输能力。

带宽与速率的区别:在数字系统中,虽然两者的单位一样,都是刻画单位时间内的数据传输量,但含义不一样。速率是一个中性的物理量,带宽是针对某个实体,是刻画该实体的最大传输能力,也就是某实体的额定速率。

### 3. 吞吐量

吞吐量(throughput)表示在单位时间内通过某个网络或接口的总数据量。吞吐量常用于对网络流量的测量,以便知道到底有多少实际的数据量通过网络。

显然,吞吐量受网络带宽或网络额定速率的限制。常常有这样的体验,登录同一个网站,有时速度很快,有时速度很慢(如每学期的选课网站),就是受到网站网络出口带宽的限制,网站最高吞吐量是一定的,因为同时访问的人数不同,每个人分得的吞吐量不同。

吞吐量与带宽的区别:带宽是指某实体的额定速率,表示其最大能力。吞吐量表示实际传输量的大小。吞吐量受多种因素的影响,往往小于带宽所表示的额定速率。

### 4. 时延

时延(delay 或 latency)是指数据(一个数据包或比特)从网络的一端传送到另一端所需要的时间。时延是一个很重要的性能指标,也是实际系统中实现难度最大的一个指标。5G 通信中,为了实现 1ms 的时延指标,需采取很多措施。

时延又分为以下 4 种。

#### 1) 发送时延

发送时延是主机或路由器发送数据帧所需的时间,也就是从发送数据帧的第一个比特开始,到最后一个比特发送完毕所需要的时间。发送时延的计算公式是:

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据帧长度}(b)}{\text{发送速率}(b/s)} \quad (3-1)$$

可见,发送时延与数据帧长度和发送速率有关,与数据帧长度成正比,与发送速率成反比。提高发送速率可以降低发送时延,但发送速率不会高于信道带宽,同时还会受到流量控制、拥塞控制等多种因素的影响,不是可以随意增加的。因此发送时延也称为传输时延(注意区分后面的传播时延)。

#### 2) 传播时延

传播时延是电磁波在信道中传播一定距离需要花费的时间。传播时延的公式是:

$$\text{传播时延} = \frac{\text{信道长度}(m)}{\text{电磁波在信道上的传播速率}(m/s)} \quad (3-2)$$

电磁波在自由空间的传播速度是光速,即  $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

电磁波在有线网络中的传播速度比在自由空间中低一些：在铜线中传播速率约为  $2.3 \times 10^8$  m/s, 在光纤中的传播速率约为  $2 \times 10^8$  m/s。

电磁波在指定介质的传播速率是固定的, 从式(3-2)可以看出, 信道长度固定了, 传播时延也就固定了, 这是固有的物理特性, 没有办法改变。

发送时延(传输时延)与传播时延的区分: 发送时延与传播时延是两个重要的时延指标, 也是容易混淆的两个概念。

传播时延与电磁波的传播相关, 是由物理特性决定的, 信道长度定了, 时延大小也就定了。以光纤为例, 1km 的光纤, 传播时延为  $5 \mu\text{s}$ ; 1000km 的光纤, 传播时延为 5ms。可以把这两个固定的值记住, 便于很多问题的分析。如国内某两个城市相距 2000km, 则传播时延为 10ms。5G 移动通信中强调的时延是 1ms, 可以看出, 这个时延一定不是远离网络的端到端时延。

发送时延(传输时延)与数据帧长和数据发送速率有关, 数据发送速率又与带宽相关。因此这个时延是可以改变的, 一是减少数据帧长, 二是提高带宽, 进而提高发送速率。以 1000Mb/s 的网络为例, 传输一个长度为 1Mb 的数据包, 其发送时延为  $1\text{Mb}/1000\text{Mb/s}=1\text{ms}$ 。

总之, 传播时延由传播距离决定, 是从一点到另一点的时间, 是电磁波的固有物理特性。发送时延是一定长度的数据通过某个截面所用的时间, 因此与帧长相关, 与发送一个比特的时长相关。

### 3) 排队时延

数据包在网络上传输时, 要经过很多网络节点(交换机或路由器)。数据包进入网络节点时, 首先要在输入队列中排队等待处理; 处理完毕, 还要在输出队列中排队等待转发, 这就产生了排队时延。排队时延取决于网络当时的通信量和处理机的处理速度, 当网络的通信量很大时会发生排队溢出, 造成分组丢失。

### 4) 处理时延

网络节点或主机在收到数据包时, 要花费一定时间对数据进行处理, 例如, 分析数据包的首部、差错检验、查找路由表、选定路由方向等, 这就产生了处理时延。处理时延由节点处理机的运算能力和分析数据的算法共同决定。

数据在网络中经历的总时延是以上 4 种时延的总和, 如图 3-3 所示。

$$\text{总时延} = \text{发送时延} + \text{传播时延} + \text{排队时延} + \text{处理时延} \quad (3-3)$$

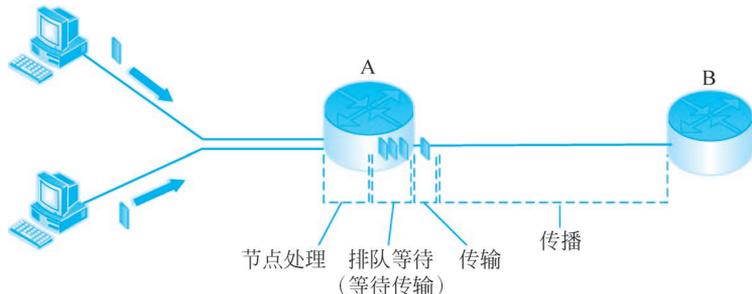


图 3-3 时延

### 5. 时延带宽积

时延带宽积(bandwidth-delay product)通过链路上的传播时延和带宽相乘而来。

$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延} \times \text{带宽} \quad (3-4)$$

时延带宽积用来计算通信线路上已经发出但还未达到接收方的比特数。

### 6. 往返时间

往返时间(Round-Trip Time, RTT)也是一个重要的网络性能指标,它表示从发送方发送数据开始,到发送方收到来自接收方的确认,总共经历的时间。RTT 在分析网络性能质量中非常有用,将在后续章节中看到其具体应用。

### 7. 分组丢失率

分组丢失率(Packet Loss Rate)是指单位时间内的丢失分组数与传输总分组数目的比率。

### 8. 分组差错率

分组差错率(Packet Error Rate)是指单位时间内的差错分组与传输总分组数目的比率。

### 9. 利用率

利用率是指网络有百分之几的时间是被利用的,没有数据通过的网络利用率为0。

当网络的通信量很少时,网络利用率低,但网络产生的时延很小。网络利用率越高,数据分组在路由器和交换机处理时就需要排队等待,因此时延也就越大。

若令  $D_0$  表示网络空闲时的时延, $D$  表示网络当前的时延, $U$  表示网络的利用率,则可以用下面的简单公式表示  $D$  和  $D_0$  之间的关系:

$$D = \frac{D_0}{1-U} \quad (3-5)$$

显然,利用率  $U$  的数值为  $0 \sim 1$ 。由图 3-4 可见,当网络的利用率达到其容量的  $1/2$  时,时延就会加倍。当网络的利用率接近最大值 1 时,网络的时延就趋于无穷大。所以绝不能认为利用率越高越好。

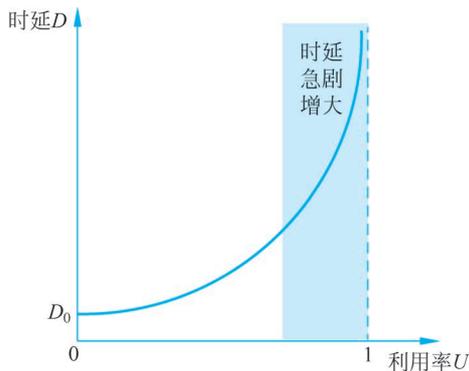


图 3-4 利用率与时延的关系

♥【技术思想启发】 利用率与时延的关系很好地反映了科学辩证思想,任何事物都是有利弊的,要客观、综合、全面地分析,不能一叶障目,更不能断章取义,不能以偏概全。

### 3.3 信息交换方式

虽然具体的交换技术种类很多,但从交换的思想和根本方式上来区分,只有三大类交换方式:电路交换方式、报文交换方式、分组交换方式。下面分别讲解这3种方式的特点和区别。

#### 3.3.1 电路交换方式

##### 1. 电路交换原理

电路交换是针对最早的语音通信来设计的,语音通信的特点是差错率要求不高,但实时性要求很高。差错率要求不高,可以从日常的语言交流中有所感觉,对同一个词,不同的人说,发音都不一样,但人们都可以听懂,即人对语音的误差有一定的容错能力。另外,语言的交流必须具有很好的实时性;否则,说一句话需要很长时间才传到对方,交流就会很困难。

针对语音通信的这个基本要求,电路交换采用面向连接、独占电路的方式来满足实时性的要求。电路交换的基本过程包括电路建立阶段、通话阶段、电路释放阶段3个过程。电路建立阶段是根据用户所拨的被叫号码,由交换机负责连接一条电路,在通话阶段该电路由该用户独占,即使该用户不讲话、不传输信息,该电路也不能分配给其他用户使用,其示意图如图3-5所示。

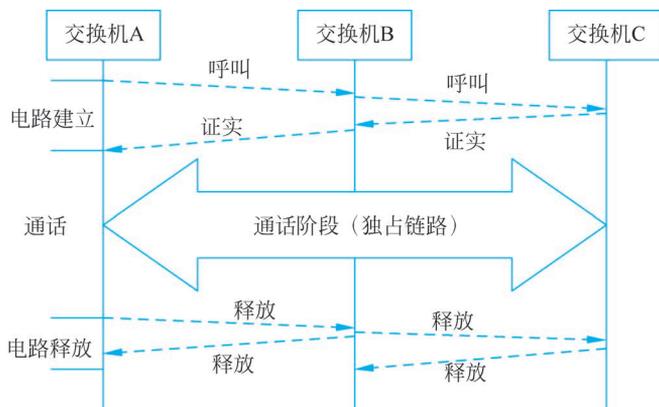


图 3-5 电路交换过程示意图

归纳起来,电路交换方式主要有如下优点。

(1) 信息的传输时延小,对一次接续而言,传输时延固定不变。因为端到端的物理链路已经在通话前完成连接,通话阶段的语音信息不再需要找路、排队,其电路是独占的,不存在拥塞。因此它只有传输时延和传播时延,这两种时延都非常小。

(2) 信息以数字信号形式在数据通路中“透明”传输,交换机对用户的数据信息不存储、不分析、不处理,交换机在处理方面的开销比较小,对用户的数据信息不需要附加用



视频

于控制的额外信息,也不进行差错控制处理,信息的传输效率比较高。

(3) 信息的编码方法和信息格式由通信双方协调,不受网络的限制。

(4) 采用基于呼叫损失制的方法来处理业务流量,业务过负荷时呼损率增加,但不影响已建立的呼叫。

(呼叫损失制是针对电路交换方式下的语音电话系统的。即在电路建立阶段,若网络资源不够,在呼叫建立阶段就拒绝用户接入,称为呼叫损失。它保障已经接入的用户拥有固定的独占的链路资源。而基于分组交换的IP采用“尽力而为”的方法,它不存在呼叫建立阶段,也不拒绝用户的接入,都是尽力去做。若用户量过大,则容易造成网络拥塞。)

同时,电路交换方式存在如下主要缺点。

(1) 电路的接续时间较长。当传输较短信息时,通信电路建立的时间可能大于信息传输时间,其网络利用率低,仅当呼叫建立与释放时间相对于通信的持续时间很小时才呈现出高效率。

(2) 整个通话期间,即使没有通话信息,电路资源也被通信双方独占,电路利用率低。

(3) 通信双方在信息传输、编码格式、同步方式、通信协议等方面要完全兼容,这就限制了各种不同速率、不同代码格式、不同通信协议的用户终端直接互通。

(4) 物理连接的任何部分发生故障都会引起通信的中断。

(5) 存在呼叫损失(简称呼损),即可能出现由于交换网络负载过重而呼叫不通。

综上所述,电路交换是一种固定的资源分配方式,在建立电路连接后,即使无信息传送也占用电路,电路利用率低;每次传输信息前需要预先建立连接,有一定的连接建立时延。但通路建立后可实时传送信息,传输时延一般可以忽略不计。电路交换的优点是时延小,缺点是固定资源分配,独占资源,资源利用不灵活,难以适应突发性高的业务需求,但很适合实时性要求高的业务。

## 2. 时分复用中的电路交换

### 1) 语音信号在同步时分复用系统中的传输

在模拟信号时代,电路交换中电路建立阶段所连接的电路是实际的物理线路(如人工交换中的绳路),非常直观,很好理解。在数字信号时代,一条物理线路被分为多个时间分割后的时隙,每个用户不能再占用整个物理线路上的全部时间位置,只能占用部分时间(如某一个时隙),若在每一帧中都占用相同编号的时隙,则为同步时分复用。

图3-6表示了利用32路PCM数字系统传输一个话路信号的情况。首先模拟语音信号经过采样量化编码后形成二进制编码,然后占用PCM系统中每一帧的TS1组成一个通路,将该话路的二进制码传输到对方,对方从每个TS1中收到该话路的数字编码,再通过D/A转换还原成模拟语音信号。这就是语音数字化和同步时分复用联合应用的整个过程和思路。

在实际的系统中,还存在多个用户如何分配时隙,如何扩大通信话路数量,如何传输控制信令,如何实现位同步和帧同步等诸多问题需要解决。

时分复用是现在所有通信系统的基础,一定要充分理解它的思想和原理,它不仅在交换系统中使用,在其他数字系统中也要用到。

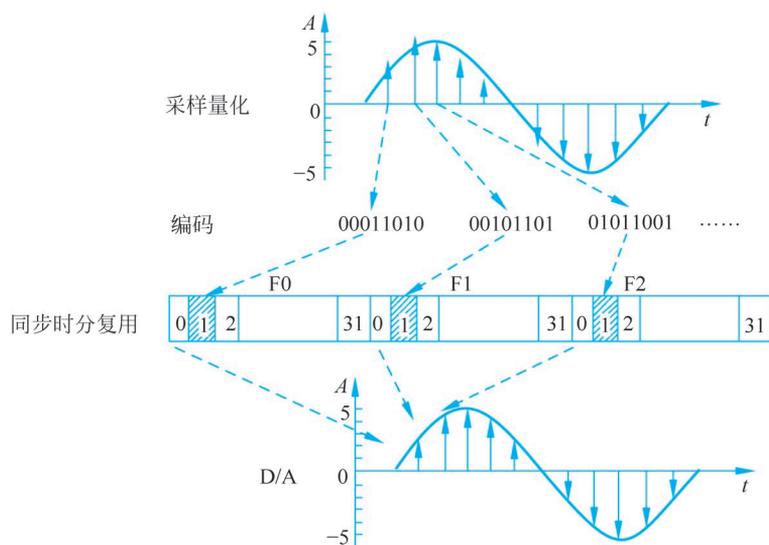


图 3-6 时分多路复用示意图

♥【技术思想启发】 语音数字化过程中,采样定理是关键,核心要素是采样频率不能变。因此在传输时,不管复用多少话路,每一路的语音必须周期性地传输,具有严格的时间限定性。想想我们的学习、工作,也是如此,重在定期的、不间断的学习,养成周期性习惯,不能三天打鱼两天晒网。

## 2) 基于时隙的电路交换

图 3-6 只表示了一个用户的信息是如何利用时分复用技术在一条线路上如何传输的,那传到了交换节点后,在交换节点是如何利用时分复用技术进行电路交换的呢?

在模拟信号时代,一条线路是一个信道,交换机建立的通信信道,实际连接的是交换机的输入端线路和输出端线路。在数字信号时代,一个时隙是一个信道,交换机建立的通信信道,实际连接的是交换机的输入时隙和输出时隙。在图 3-7 中,以用户 A 到用户 B 为例,交换机 2 连接的是输入端 TS5 时隙与输出端 TS8 时隙,而不是整个线路。

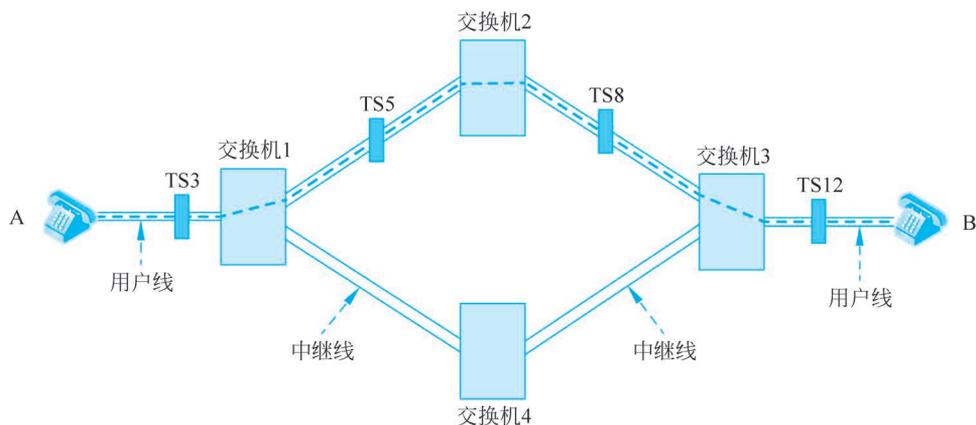


图 3-7 基于时隙的电路交换

有的同学可能会问：两条线路相连好理解，两个时隙相连怎么理解？

时隙的连接实际是利用数字信号易于存储的优点，交换机 2 在输入端 TS5 时隙到来时，将用户 A 的信息（即采样量化过后的编码）存入交换机内部的存储器，在输出端 TS8 时隙到来时，将用户 A 的信息读出来，由此完成了时隙 5 与时隙 8 的连接。信息在 TS8 时隙将信息从交换机 2 送到交换机 3。以此类推，这样就在用户 A 到用户 B 之间建立了一条 TS3-TS5-TS8-TS12 信道，完成用户 A 到用户 B 的信息传递。

### 3.3.2 报文交换方式

为了克服电路交换中各种不同类型和特性的用户终端之间不能互通、通信电路利用率低以及存在呼损等缺点，提出了报文交换的思想。它的基本原理是“存储-转发”，不需要提前连接通信双方的物理电路，而是将所接收的报文暂时存储。报文交换的过程如图 3-8 所示，A 用户要向 B 用户发送信息，A 用户不需要先连通与 B 用户之间的电路，A 只需与交换机接通，由交换机暂时把 A 用户要发送的报文接收和存储起来。报文中除了用户要传送的信息以外，还有目的地址和源地址，交换机根据报文中提供的 B 用户的地址来选择输出路由，并将报文送到输出队列中排队，等到该输出线空闲时才将该报文送到下一个交换机，这样依次转发，最后送到终点用户 B。

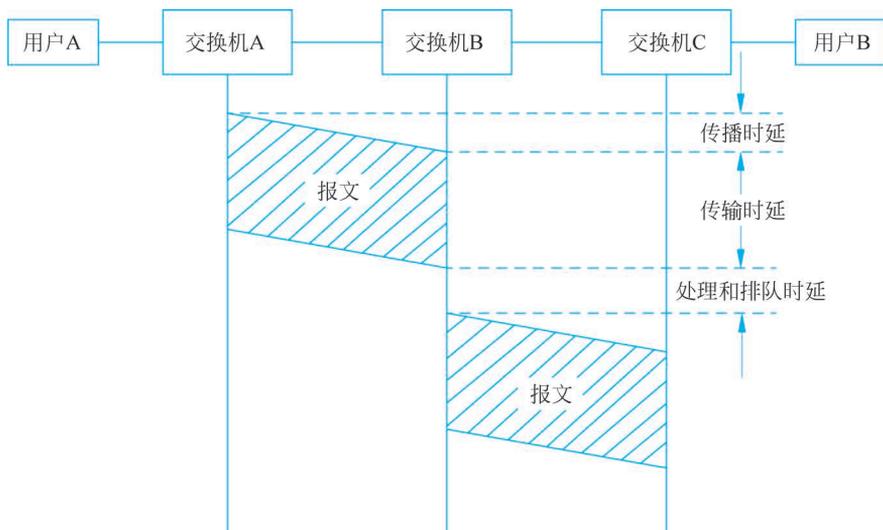


图 3-8 报文交换过程示意图

在报文交换过程中，信息的格式是以报文为基本单位。一份报文包括 3 部分：报头或标题（由发信站地址、收信站地址及其他辅助信息组成）、正文（传输用户信息）和报尾（报文的结束标志）。

公用电信网的电报自动交换是报文交换的典型应用。20 世纪 80 年代，电报因其快捷、安全等特性深受欢迎。但是进入 20 世纪 90 年代以后，电话、手机、电子邮件、网络等新的通信工具迅速崛起，电报逐渐退出历史舞台，但其仍然代表一类交换方式，其交换思想仍具有生命力。

报文交换的基本特征是交换机要对用户的信息进行存储和处理,具有如下优点:

(1) 报文以存储-转发方式通过交换机,输入/输出电路的速率、码型格式等可以不同,很容易实现各种不同类型终端之间的相互通信。

(2) 在报文交换的过程中没有电路接续过程,来自不同用户的报文可以在一条线路上以报文为单位进行多路复用,线路可以按其最高传输能力工作,线路的利用率高。

(3) 用户不需要通知对方就可发送报文,无呼损。如果需要,同一报文可以由交换机转发到许多不同的收信地点,即可以发送多目的地址的报文,类似于计算机通信中的多播机制。

报文交换的主要缺点有:

(1) 信息通过交换机时产生的时延大,而且时延变化也大,无法满足实时通信的要求;

(2) 交换机要有能力存储用户发送的报文,其中有的报文可能很长,要求交换机具有高速处理能力和足够大的存储容量。



视频

### 3.3.3 分组交换方式

#### 1. 为什么出现分组交换

随着计算机的发展,数据通信的需求越来越大,由于数据与语音的传输要求不同,如采用前面的电路和报文交换方式都不能很好地满足数据通信的要求。为了分析其具体原因,应先了解语音和数据对通信的不同要求,详见表 3-2。

表 3-2 语音通信与数据通信的不同要求

对比项	语音通信	数据通信
差错率	要求不高,一般为 $10^{-6}$	要求高,一般为 $10^{-9}$ ,同时还要做差错控制,保证数据的完全正确
实时性	要求高,时延为毫秒级	要求不强,时延可以为分钟级
突发性	不高,恒定速率	数据突发率高,速率变化大

语音通信的特点是差错率要求不高,一般不大于  $10^{-6}$  即可,但实时性要求高,时延要求在毫秒级。数据通信刚好相反,对实时性要求不高,时延允许为分钟级甚至小时级,但对差错率要求很高,一般要求传输差错率在  $10^{-9}$  以下,同时,还要通过差错控制,进一步保证数据的正确性。对实时性的要求从电子邮件应用中可以有所体会,发送一封电子邮件有几分的时间延迟,人们都可以接受;在网页类的交互数据中,则只能忍受秒级的时延。对差错率的要求可以从下载数据包得到直观感受,从网上下载一个 zip 文件,若错了一个关键的比特位,整个包都无法解包。这就是数据通信与语音通信相反的两个要求。针对不同的要求,应当如何改进或提出新的交换方式来适应数据通信的要求呢?

前面介绍的电路交换不利于实现不同类型的数据终端设备之间的相互通信,而报文交换信息传输时延又太长,不满足许多数据通信系统的实时性要求,分组交换方式较好地解决了这些问题。

注意,实时性要求是相对而言的,数据通信的实时要求是指计算机通信的用户可以顺畅地交互传输信息,相对于语音毫秒级的时延要求,数据通信的实时性要求要宽松得多,但相对于报文交换以天为单位的时延,数据通信的实时性又要高很多。

## 2. 分组交换的思路

分组交换采用报文交换的存储-转发方式,但不像报文交换那样以报文为单位进行交换,而是把报文裁成许多比较短的、被格式化了的“分组”进行交换和传输。由于分组长度较短。具有统一的格式,便于在交换机中存储和处理,“分组”进入交换机后只在存储器中停留很短的时间,进行排队处理,一旦确定了新的路由,就很快输出到下一个交换机或用户终端,“分组”穿过交换机或网络的时间很短,能满足绝大多数数据通信用户对信息传输的实时性要求。

采用存储-转发方式的分组交换与报文交换的不同在于:分组交换将用户要传送的信息分割为若干分组,每个分组中有一个分组头,含有可供选路的信息和其他控制信息。分组交换节点对所收到的各个分组分别处理,按其中的选路信息选择去向,发送到能到达目的地的下一个交换节点。分组交换的分组传输过程和时延如图 3-9 所示。比较图 3-8 与图 3-9 可以看出,分组交换的时延小于报文交换的时延。这是因为分组交换是分成多个分组来独立传送的,收到一个分组即可以发送,从而显著减少了存储的时间。这种方法称为流水线方法。在 CPU、DSP 和日常生活中都有流水线方法的应用。

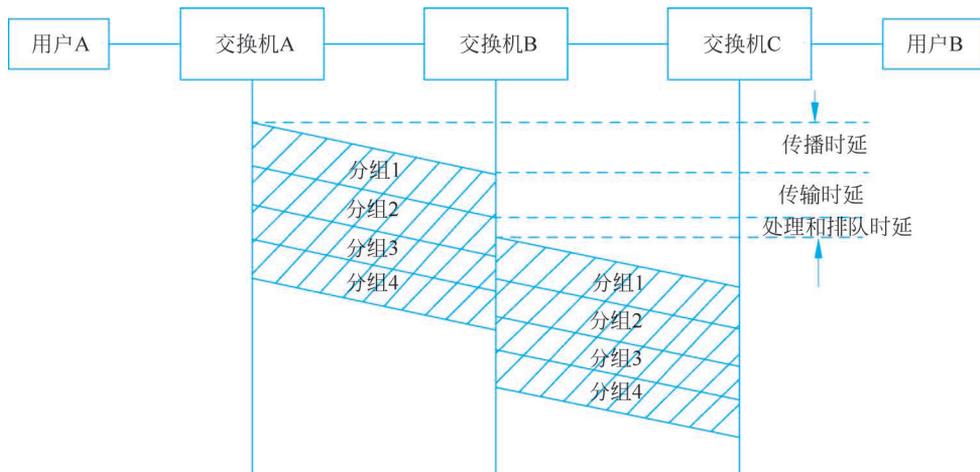


图 3-9 分组传输过程和时延示意图

但是,正是由于分成多个分组,也增加了开销。为此,分组长度的确定是一个重要的问题。设分组数据长度为  $d$ , 分组头长度为  $h$ , 数据传输速率为  $v$ , 若分组长度短, 则传输时延小 ( $d/v$ ), 但会增加开销[因为相同长度的原始数据需要切分的数据段更多, 需要增加的分组头更多, 或者按  $d/(d+h)$  计算,  $d$  小则数据效率低, 额外开销大]; 若分组长度长, 则可减少开销, 但增加了时延, 二者是一对矛盾, 理论上二者无法兼顾。因此, 在实际应用中通常根据具体的应用需求兼顾时延与开销两方面来确定分组长度。

相对于电路交换的固定资源分配方式, 分组交换属于动态资源分配方式, 对链路的

使用采用的是统计复用方式,不独占链路,因此其链路利用率高。同时,它采用差错控制等措施,使其可靠性高,但差错控制又带来了更大的传输时延。

需要说明的是,分组交换是一种大类交换方式,后来发展起来的 ATM、IP、MPLS 等其他交换技术,从根本的交换思想和方式上来看都属于分组交换这个大类,只是具体的技术细节有所区别。

从电路交换的同步时分复用到分组交换的异步时分复用,从本质上来说,就是对链路资源的利用方式不同,或者说资源分配的思想不同,因此在分析分组交换原理之前,先从资源分配角度来看看它们有何不同。

### 3. 资源分配角度看交换

对同一个物理链路资源的利用可以有不同的资源分配方式,电路交换和分组交换分别采用固定分配资源法和动态分配资源法。

#### 1) 固定分配资源法

固定分配资源法也称为预分配资源方法,它是根据用户需求预先把链路传输资源的某一部分固定地分配给某个用户,每个用户的数据都在固定的子信道中传输。具体的实现方法是,在电路上按时间分割成等长的时间单元(称为帧),在每帧里又按时间分成等长的时隙,并按照时间顺序编号。每帧中相同时间位置的时隙用来传输同一信源的信息,接收时很容易根据时间位置区分不同的用户信息,因此将这种子信道称为位置化信道。

在这种方式下,每个用户在每帧中所占用的时间位置都是预先分配好的、是固定不变的。多个低速的数据信号按照各自固定位置的方式合并一条高速的数据通路上,因此也称为同步时分复用。

在这种复用信道下完成不同用户之间的信息交换,只需改变用户在信道上的时间位置即可完成交换,时隙交换原理在 3.3.1 节已作分析,具体交换过程可上网查阅“时间接线器”。因此,采用固定分配资源方式下的交换称为同步时分交换,前面所讲的电路交换就是这种方式。

固定分配资源方式下,每个用户只能在分配到的时间里向链路资源发送信息和接收信息,如果在分配的该时间内该用户没有信息需要传输,也不能临时将该时间分给其他用户使用,而只能保持空闲状态,显然链路资源利用率很低。这种方法尽管实现了多个用户对一条传输链路资源的共享,但由于采用固定分配方法,链路传输能力不能得到充分利用,这是固定分配资源方式的不足之处。

#### 2) 动态分配资源法

为了克服固定分配资源法的缺点,采取用户有数据传输时才为其分配资源的方式,称为动态分配或按需分配。当用户暂停发送数据时不分配链路资源,链路的传输能力可用于为其他用户传输数据。在许多情况下,各单路信号是断断续续的,传送单路信号的链路上有很多空闲时间,因此可将此空闲时间分配给其他用户使用。这种根据用户实际需要动态分配链路资源的方式称为统计时分复用(Statistic Time Division Multiplexing, STDM)。

这样每个用户的数据传输速率可以高于平均速率,理论上最高可以达到链路总传输能力。例如,对 32 路的 E1 链路,传输速率为 2Mb/s,32 个用户的平均速率为 64kb/s,当用固定分配复用方式时,每个用户最高传输速率为 64kb/s,而在统计时分复用方式下,每个用户的最高速率可以达到 2Mb/s(包含用户信息的分组头在内)。统计时分复用原理如图 3-10 所示。

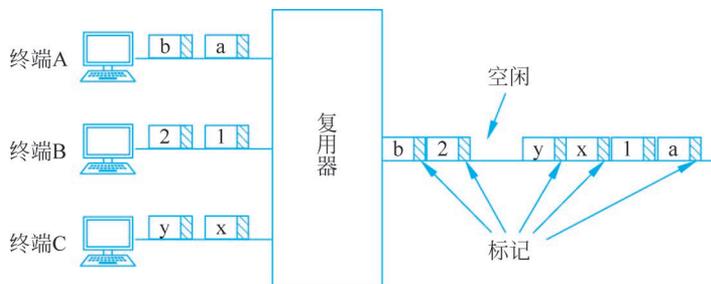


图 3-10 统计时分复用原理

在统计时分复用方式下,各个用户的数据在通信链路上互相交替传输,没有固定的时间位置,此时出现的新问题是:如何区分不同用户的数据?

为了识别来自不同终端的用户数据,采取的措施是:在发送到链路之前先给这些数据打上与终端或子信道有关的“标记”,通常是在用户数据的开头加上终端号或子信道号,这样在接收方就可以通过识别用户数据的“标记”来加以区分。这与生活中的快递包裹类似,在包裹单上标明收件人、发件人的地址、姓名和电话。

统计时分复用对每个单路信号分别标注一个独有的标记,这个标记称为标志码,通过该标志码来区分不同用户的数据。与位置化信道相对应,这种统计复用信道称为标志化信道,用户数据与时间位置无关,只与其标志有关。在统计时分复用方式下,变换代表某个子信道的标志,即可完成交换,这就是分组交换的根本功能。

统计时分复用的优点是可以获得较高的信道利用率。由于在分组交换方式中,每个终端的数据使用一个自己独有的“标记”,可以把传输信道按需动态地提供给每个终端用户,从而提高了传输信道的利用率。

统计时分复用也有其不足,每个用户在各帧中传输的时刻不固定,会出现随机时延和丢失数据的可能。这是由于各个用户需要传送数据的时刻、频度和流量等都是随机的,若多个用户同时发送数据,则必然会有部分用户需要等待一定的时间才可能获得信道资源而进行传输,其时延会随着网络负载的增加而增加。等待的过程就是排队的过程,也是缓冲存储的过程,由于缓冲器容量总是有限制的,严重时可能因缓冲区溢出而造成部分数据丢失。

两种资源分配方式对应的两种时分复用方式和两种信道类型的比较如图 3-11 所示。

#### 4. 分组交换的工作过程

在如图 3-12 所示分组交换的例子中,终端 I 产生两个数据包 a、b,将这两个数据包送到交换机 I,交换机 I 将数据包 a 通过交换机 II、交换机 III 送到终端 IV,而将数据包 b

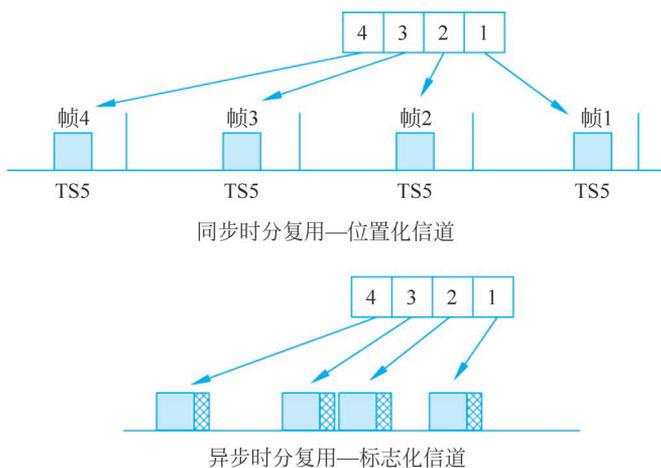


图 3-11 两种时分复用方式对比

直接通过交换机Ⅲ送到终端Ⅳ。由此可以看出,在分组交换方式下,同一个用户的数据可以经过不同的路径进行传输,不像电路交换那样需要通过相同的固定电路进行传输。另外,从图 3-12 还可以发现,分组式终端Ⅴ可以“同时”接收来自终端Ⅱ和终端Ⅲ的数据,这就是同一台计算机可以同时多个网络通信的原因。

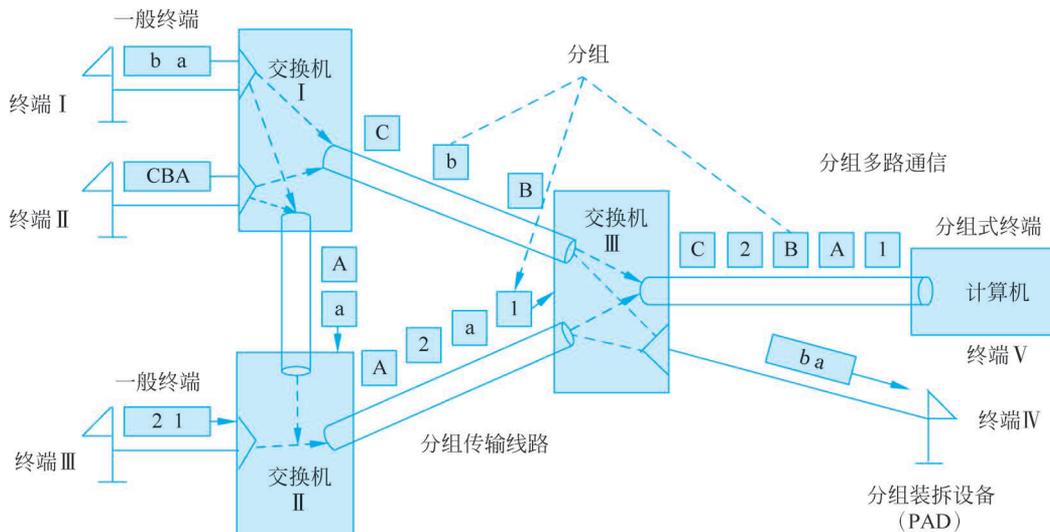


图 3-12 分组交换工作过程

分组交换的工作流程是首先把用户要传送的信息分成若干小的数据块,即分组,这些分组具有统一标准的格式,每个分组均有分组头(Head),分组头存放用于控制和选路的有关状态信息和控制信息。这些分组以“存储-转发”的分组交换方式在网内传输,即每个分组交换机首先对收到的分组进行缓存,分析该分组头中有关选路的信息并确定路由选择,然后在所选择的路由上再次进行排队等待,直到该路由上有空闲信道时转发给下一个交换节点或用户终端。

显然,采用分组交换时属于同一个报文的多个分组可以并行传输;另外,不同用户发出的数据也可以共享同一物理信道。因此,分组交换可以实现资源共享,并为用户提供可靠、有效的数据传输服务,成功地克服了电路交换中独占链路以及链路利用率低的缺点。相比报文交换,分组的长度短、格式统一,便于交换机进行处理,因此它又比传统的“报文交换”有更小的时延。

### 5. 数据分组

在分组交换中,数据分组是交换和传输处理的对象。数据分组是由终端将欲发送的用户信息块(报文或数据报)分成若干符合标准格式的块,然后给每个块加上分组头,分组头用于存储具有标准格式的控制信息、地址信息和状态信息。

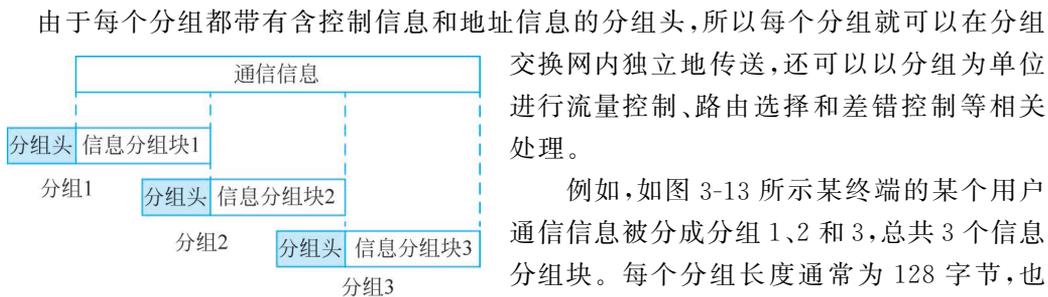


图 3-13 分组示意图

由于每个分组都带有含控制信息和地址信息的分组头,所以每个分组就可以在分组交换网内独立地传送,还可以以分组为单位进行流量控制、路由选择和差错控制等相关处理。

例如,如图 3-13 所示某终端的某个用户通信信息被成分组 1、2 和 3,总共 3 个信息分组块。每个分组长度通常为 128 字节,也可根据通信链路的质量选用 32、64、256 或 1024 字节的模式。

### 6. 分组交换的优缺点

设计电路交换方式的初衷是实现语音信号的传输与交换,设计分组交换方式的初衷是为了实现计算机之间的资源共享,两者的设计思路完全不同。从前面的分析可以发现,基于动态统计时分复用方式的分组交换可以显著提高线路资源利用率,每个分组都携带了控制信息,使终端和交换机之间的用户线上或者交换机之间的中继线上,均可同时有若干不同用户终端按需进行资源共享。这种资源共享大大降低了用户费用。

由于采用存储-转发方式,无须预先建立端到端的物理连接,也就不必如电路交换方式那样采用严格的控制规程。分组交换也相对易于实现不同类型的数据终端设备(不同的传输速率、不同的代码、不同的通信控制规程等)之间的通信。

每个分组沿着分组交换网络内的通路传送时,有逐段、独立的差错控制和流量控制,即使在传输介质不太好的情况下,端到端误码率也可以被控制在  $10^{-11}$  以下,保证了传送质量。另外,分组交换方式的路由选择和拥塞控制等功能,能保证在网内线路或某些分组交换设备出现故障后,可为所传送分组自动、智能地选择一条迂回路由,避开故障点。逐段的流量控制机制可以及时检测到分组交换网有无过负荷发生,必要时可以通过拒绝接收新的用户请求,以控制分组交换网不至于严重过负荷。

不难想象,由于分组交换在降低通信成本、提高通信可靠性等方面有巨大的优势,因此,自从 20 世纪 70 年代后期以来,有力地推动了数据通信网的高速发展和普及。

分组交换技术也有其弱点。首先是其信息传送时延大：基于存储-转发的处理模式，使得各个分组在经过每个分组交换设备时都要经历存储、排队、转发的过程，因此，分组穿过分组网络的平均时延较长。

用户信息被分成了多个分组进行传送，其分组头都需要分组交换机的分析处理，必然需要较大开销。因此，传统的分组交换主要面向计算机通信等突发性或断续性业务的需求，却不适用于实时性要求高的通信业务。

分组交换技术的协议和控制比较复杂，如逐段链路的流量控制、差错控制，加上编码和速率的变换、网络管理控制等，一方面使得分组交换具有很高的可靠性，同时加重了分组交换机处理负荷，使得分组交换机的分组吞吐能力和传送速率受到了明显抑制。

综上所述，早期的分组交换技术对语音通信（电话）和高速数据通信并不适合，难以满足对实时性要求较高的电话和视频等业务。其实这也是受当时的技术所限，在通信网以模拟通信为主的年代，用于传送数据的信道大多数是电话通信信道，当时技术水平能达到的数据传输速率一般不大于 9.6kb/s，误码率不低于  $10^{-5}$ 。如此高的误码率难以满足数据通信对数据传送的高质量要求，因此，不得不通过额外增加一系列复杂控制手段，才把误码率降低到  $10^{-11}$  的水平，基本满足了当时数据通信的要求。

为了提高分组交换网的分组吞吐能力和传输速率，一方面要提高传输能力，另一方面也要改进分组交换技术。光纤通信技术的发展为分组交换技术的发展开辟了新的道路，光纤的数字传输误码率可以达到  $10^{-12} \sim 10^{-9}$ ，光纤数字传输系统能提供数百兆及更高的速率。在这种通信信道条件下，分组交换中逐段的差错控制、流量控制就显得没有必要了，快速分组交换（Fast Packet Switching, FPS）技术应运而生。快速分组交换技术的主要思路是尽量简化协议，只提供基础的网络功能。帧中继作为快速分组交换的一种典型技术，取得了巨大成功并得到广泛的应用。

♥【技术思想启发】 电路交换独占链路，因此实时性好，但难以适应带宽突发率高的业务要求，适合语音业务；分组交换共享链路，很容易适应带宽突发率高的业务要求，但时延大，适用于数据业务。在前面介绍多种技术时都看见，任何好处必有代价，树立辩证思维，认识到天上不会掉馅饼。想通了此点，防止电信诈骗的意识和能力也会更强。

## 7. 逻辑信道

在同步时分复用方式下，同一个时隙号固定分配给一个用户，一般直接用时隙的编号作为信道编号。时隙是一个时间量，时间是物理量，各帧中相同时隙号组成的信道是物理信道。

在统计时分复用方式下，时隙不再固定分配给用户，因此不能再直接用时隙号作为信道号了。那信道如何表示？多个信道又如何区分呢？于是引入了一套新的编号机制，用虚拟的逻辑编号来对信道进行编号，该编号与物理时隙没有关系，这样就实现了信道与物理时隙的分离。不同的用户分配不同的编号，则可以把来自各个终端的数据分组在链路上完全区分开，如同把传输链路划分成若干子信道一样，这种子信道称为逻辑信道。逻辑信道为各个终端提供相互独立的数据传输虚拟通路。各个逻辑信道用不同的代号表示，该代号即逻辑信道号。本质上，逻辑信道号代表着传送链路的部分资源，当某个终端要求通信时，统计时分复用器就负责分配一个逻辑信道号给它。

逻辑信道号与各个终端的代号无关：同一个终端，每次呼叫被分配的逻辑信道号都可能不同。一个终端可以同时通过网络建立多个数据通路，统计时分复用器为每个通路分配一个逻辑信道号，并维护一个终端号与逻辑信道号的映射表：通过逻辑信道号，可以识别出它是哪个终端发来数据，如图 3-14 所示。

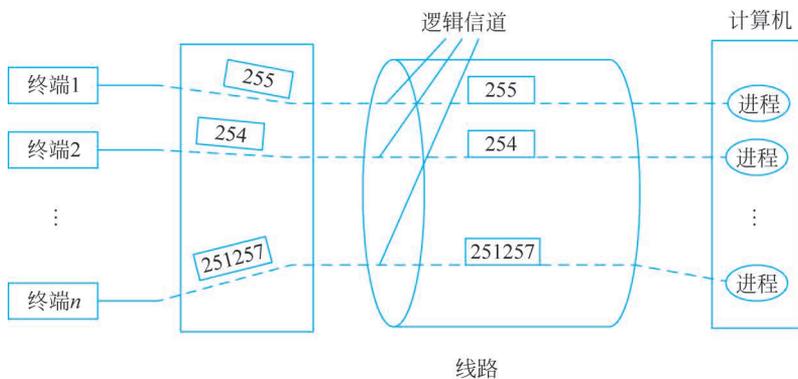


图 3-14 逻辑信道的功能原理

逻辑信道号是在用户至交换机或交换机之间的中继线上被分配的，代表了信道的一种编号资源。在每一条物理链路上，逻辑信道号的分配是相互独立的，也就是说，逻辑信道号并不在全网中有效，而是在每段物理链路上局部有效，即仅具有局部意义。

由分组交换网内的分组交换设备负责出/入线上逻辑信道号的转换工作。

每个逻辑信道可被定义为总是处于几种工作状态的转移过程中，例如“准备好”状态、“呼叫建立”状态、“数据传输”状态、“呼叫清除”状态等。

逻辑信道及逻辑信道号是理解后续虚电路的基础。逻辑信道实现了逻辑与物理的分离，带来了非常好的灵活性，类似的思想在后续很多技术会用到，也是现代网络思想中的一大法宝。

### 8. 数据报与虚电路

如前所述，在分组交换网中，来自各个用户的数据被分成一个个分组，这些分组将沿着各自的逻辑信道，从源点出发，经过网络达到终点。那么，分组是如何通过网络的？或者说是分组所经过的各个网络节点之间有无配合？分组通过网络的时延如何？

分组在通过数据网时有两种方式：数据报 (Datagram) 方式和虚电路 (Virtual Circuit) 方式。这两种方式各有特点，适应不同业务的需求。

注意，这里的数据报是指一种交换方式，第 7 章中用户数据报协议 (User Datagram Protocol, UDP) 中的数据报是指报文名称。在后续内容中要注意根据上下文语境来分析其具体含义。早期的通信网络与计算机网络各自独立发展，定义一些概念时没有互相沟通，导致一些术语虽然字面相同，但其含义不同。另外，有的术语不同，但其含义相同。在学习过程中要注意区分。

#### 1) 数据报方式

数据报方式类似于报文传输方式，将每个分组作为一份报文来对待，每个数据分组



视频

中都包含目的地址信息,即每个分组都作为独立的信息单元在网上传输,即使是同一个终端发出的若干数据分组,分组网络也无须关注它们之间是否相关。分组交换机为每一个到来的数据分组独立地寻找路径,因此属于同一份报文的不同分组可能沿着不同的路径到达终点,经历不同的延时,甚至出现乱序,因此在终点必须重新排序,以恢复出正确的原始数据信息。

对于小数量的报文,数据报方式节省了建立链路需要的时间,尤其当有些数据本身就只有一个分组时,这种方式效率非常高。

图 3-15 中的终端 A 有 3 个分组 a、b、c 要送给终端 B,在网络中,分组 a 通过交换机 2 进行转接到达交换机 3,分组 b 通过交换机 1 与交换机 3 之间的直达路由到达交换机 3,分组 c 通过交换机 4 进行转接到达交换机 3。由于每条路由上的业务情况(如负荷、时延等)不尽相同,3 个分组不一定按照原来的顺序到达,因此在交换机 3 中要将它们重新排序,再送给终端 B。这个简单例子很清晰地反映出数据报的特点。

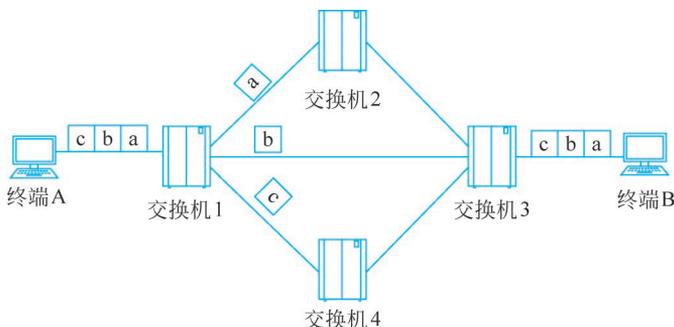


图 3-15 数据报方式

(1) 整个通信是直接、独立地传送每个分组,无须事先建立连接,对于短小的报文通信效率很高,因此适用于短报文传送。

(2) 每个分组头要包含详细的目的地址,独立选路,开销较大。

(3) 每个节点自由选路,易于避开网络中拥塞路径或故障节点,因此健壮性较好。

(4) 分组不能保证按原来的顺序到达,在网络终点必须重新排序。

(5) 端到端的差错控制和流量控制由用户终端负责,与网络无关。

## 2) 虚电路方式

虚电路方式是指两个用户终端设备在开始传输数据之前必须通过网络建立逻辑上的连接。一旦建立了这种连接,用户发送的数据(以分组为单位)就将通过该路径顺序地经网络传送到终点。当通信完成之后用户发出释放链路的请求,网络拆除该连接。这种方式非常类似电路交换中的通信过程。只不过此时网络中建立的是虚电路而非物理电路,也不像电路交换方式那样是透明传输的,而是会受到网络负载的影响,分组可能在分组交换机中等待输出链路空闲后才进行信息传输。

两终端用户在相互传送数据之前要通过网络建立一条端到端的逻辑上的虚连接,称为虚拟电路(Virtual Circuit, VC, 简称虚电路)。一旦建立了这种虚电路,属于同一呼叫的数据均沿着这一虚电路传送。当用户不再发送和接收数据时,拆除该虚电路。在这种

方式下,用户的通信需要经历连接建立、数据传输、连接释放3个阶段,即是面向连接的方式。

需要强调的是,分组交换中的虚电路和电路交换中建立的电路不同:

分组交换以统计时分复用的方式在一条物理链路上可以同时建立多个虚电路,两个用户终端之间建立的是虚连接;而在电路交换中,是以同步时分方式进行复用的,两用户终端之间建立的是实连接。

在电路交换中,多个用户终端的信息在固定的时间段内向所占用的物理链路上发送信息,即使某个时间段某终端无信息发送,其他终端也不能在分配给该用户终端的时间段内向链路上发送信息。而虚电路方式则不然,每个终端发送信息没有固定的时间,它们的分组在节点机内部的相应端口进行排队,当某终端暂时无信息发送时,链路的全部带宽资源都可以由其他用户共享。换句话说,建立实连接时,不但确定了信息所走的路径,同时还为信息的传送预留了带宽资源;而在建立虚电路时,仅仅是确定了信息所走的端到端的路径,但并不一定要求预留带宽资源。之所以称这种连接为虚电路,是因为每个连接只有在发送数据时才排队竞争占用物理的带宽资源。

如图3-16所示的网络中建立了两条虚电路,VC1: A—1—2—3—B, VC2: C—1—2—4—5—D。所有A—B的分组均沿着虚电路VC1的路径从A到达B,所有C—D的分组均沿着虚电路VC2的路径从C到达D,在交换机1和交换机2之间的物理链路上,VC1、VC2共享资源。若VC1暂时无数据可送时,网络将保持这种连接,但将所有的传送能力和交换机的处理能力交给VC2,此时VC1并不占用带宽资源。

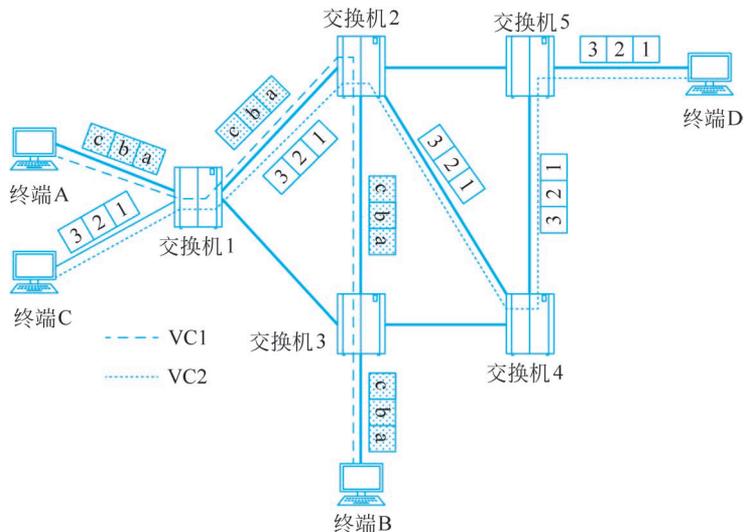


图 3-16 虚电路方式

虚电路的特点归纳如下:

(1) 虚电路的路由选择仅发生在虚电路建立的时候,在以后的传送过程中,路由不再改变,这将减少交换机对各个报文的选路开销,从而减少处理时延。

(2) 由于所有分组遵循同一路由,这些分组将以原有的顺序到达目的地,终端不需要进行重新排序。

(3) 一旦建立了虚电路,每个分组头中就不再需要有详细的目的地址,而只需有逻辑信道号就可以区分每个呼叫的信息,这可以减少每个分组的额外开销。

(4) 虚电路是由多段逻辑信道构成的,每个虚电路在它经过的每段物理链路上都有一个逻辑信道号,这些逻辑信道级联构成端到端的虚电路。

(5) 当网络中链路或者设备发生故障时,可能导致虚电路中断,必须重新建立连接。

(6) 差错控制和流量控制由网络相关节点负责。

(7) 虚电路适用于一次建立后长时间传送数据的场合,其持续时间应显著大于呼叫建立时间,如文件传送、传真业务等。

虚电路的实现又分为两种:交换虚电路(SVC)和永久虚电路(PVC)。交换虚电路是指在每次呼叫时用户通过发送呼叫请求分组来临时建立虚电路的方式。如果有用户事先已经要求网络运营商专门建立了固定的虚电路,就不需要在呼叫时再临时建立虚电路,可以直接进入数据传送阶段,这种方式是永久虚电路,适用于业务量较大、连续使用时间长的集团用户。

### 3.3.4 交换方式对比分析

交换方式是通信网络中的关键之一,是理解其他很多技术的基础,因此要透彻理解,达到能灵活应用的程度。为便于理解,这里从多个角度对几种交换方式进行对比,各个对比项见表 3-3 和表 3-4,以期从不同的角度去认识常用的几种交换方式,促进深入理解和灵活应用。

表 3-3 电路交换与分组交换的对比

编号	对比项	电路交换	分组交换
1	业务要求	语音:差错率要求不高,实时性要求高。突发性不强	数据:实时性要求不强,差错率要求极高。突发性强
2	复用方式	同步时分复用	统计时分复用
3	信道类型	位置化信道 空间位置,时间位置	标志化信道
4	连接与否	面向连接,满足实时性要求	面向无连接
5	资源分配	静态(固定)资源分配	动态资源分配
6	资源利用	独占	共享
7	路与包	面向“路”	面向“包”
8	多段传输	端到端传输(直达终点)	逐段传输(分组转发)
9	选路者	事前用信令	事中用规则
10	层位置	物理层	链路层
11	服务方式	呼叫损失制,立即拒绝	来者不拒,排队等待,尽力而为



视频

表 3-4 虚电路与数据报的对比

编号	对比项	虚电路	数据报
1	可靠性思路	可靠通信由网络来保证	可靠通信由用户主机来保证
2	建立连接	必须有	不需要
3	目的站地址	仅在连接建立阶段使用,每个分组使用短的虚电路号	每个分组都有目的站的全地址
4	路由选择	在虚电路连接建立时选路	每个分组独立、临时选择路由
5	分组的转发	属于同一条虚电路的分组均按照同一路由进行转发	每个分组独立进行转发
6	路由器出现故障时	所有通过故障路由器的虚电路均不能工作	出现故障的路由器可能会丢失分组,一些路由可能会发生变化
7	到达顺序	总是按发送顺序到达目的站	可能失序
8	端到端的差错处理	由通信子网负责	由主机负责
9	端到端的流量控制	由通信子网负责	由主机负责
10	时间开销方面	建立连接的开销	每个包独立路由,每个包的时间开销较大
11	拥塞避免方面	可避免拥塞	避免拥塞的难度大
12	健壮性方面	脆弱——线路故障会导致中断	健壮——线路故障可调整路由

这里重点分析了典型的交换方式,它们是其他各类具体交换技术的根本。在实际应用中,有很多具体的交换技术,都是从这几类交换方式派生出去的。如第2章讲的人工交换、步进制交换、纵横制交换、程控交换都是电路交换的具体实现技术,帧中继、ATM、IP、MPLS等都是分组交换的具体实现技术。因此,要理解各类交换技术,必须先透彻理解本节介绍的交换方式。抓住根本,其具体的呈现形式就容易理解了。

## 3.4 通信协议

### 3.4.1 协议概述

#### 1. 为什么需要通信协议

通信一定是双方或多方相互配合的事情。一个人自言自语不是通信,两个人以上的一问一答才是通信。通信设备之间也一样,要相互“听”懂对方的语言,形成对话,才能完成通信。这个语言就是设备之间的通信协议,没有通信协议就没有互相听得懂的语言,则无法通信,因此通信协议在通信网络中是必需的。

通信协议是指通信双方完成通信或服务必须共同遵循的规定或规则,通信协议又称通信规程。若网络中只有通信终端、交换机、路由器等网络实体,则还不能进行通信,还必须有通信协议,所有网络实体按照事先约定的规则进行数据传输和交换,相互配合才能完成通信。

通信协议应对数据的表示形式、数据格式、同步方式、传送速度、传送步骤、应答方式、纠错方式、语法规则、语法含义等内容做出统一约定。

由于通信环境与通信条件的复杂性,为了实现可靠通信,通信协议需要考虑的因素

很多,也因此而变得很复杂。随着计算机技术的广泛应用,越来越多的网络实体采用计算机来实现,网络实体的分工也越来越细,实体的种类和数量也越来越多,带来实体之间的协议种类也越来越多。实际的协议成千上万种,不可能全部学完,因此要善于抓住协议的共性内容,学习常见的一些协议,理解其根本,然后达到举一反三、触类旁通的效果。

## 2. 通信协议的特点

- (1) 作用域的每个设备都必须了解协议,并且预先知道所要完成的所有步骤。
- (2) 作用域中的每个设备都必须同意并遵循它。
- (3) 协议必须是清楚的,每一步必须明确定义,且不会引起误解。

## 3. 信令与协议的区别

通信中有“协议”和“信令”两个相近的概念,有的不区分它们,直接混用;有的有一定区分,但又没明确指明其区别。本书根据作者的理解进行说明。

信令与协议的相同点包括:

- (1) 都是设备之间的语言。
- (2) 都是设备之间完成通信的一套规则。
- (3) 都起控制作用。

下面分析信令与协议的不同之处。

(1) 信令(Signaling): 在电信网的实体之间,专门为建立和控制接续而规定的规则集;协议(Protocol): 通信实体之间支撑信息交换过程的规则集。

(2) 信令用来建立、管理、删除连接,以使用户能够正常通过这些连接进行通信;协议是通过网络传送数据的规则集合,是对数据格式和计算机之间交换数据时必须遵守的规则的正式描述,用于规定信息的格式以及如何发送和接收信息的一套规则。

(3) 在传统电信网中称信令;在计算机网络中称协议。

(4) 信令强调用信号传递某种信息;协议的范围更广,除了传递某种信息外,还包含实体之间的行为规则。

(5) 信令本身是一种信息,是一种用于控制的信号,需要在网络中传输;协议中的控制报文是一种信息,与信令相同,也需要在网络中传输,但它还可能只是一种规则,并不在网络中传输。

(6) 信令有专门传送信令的传送网络,称为信令网;协议一般不使用单独的传输网络,大都与业务网在同一网络中传输。

(7) 信令的实时性要求高;协议的实时性要求比信令低。

(8) 信令也属于协议,是一种主要传送控制信息为目的的协议。

### 3.4.2 协议四要件

协议是通信实体之间的一种语言,语言是一种抽象的信息,要准确地表达并实现协议,需要4个必备的要件,分别是协议的信号表示形式、协议的传递方式、协议的应答方式、协议的实现要素。下面分别对这4个要件进行阐述。



视频

### 1. 协议的信号表示形式

协议本身是一种信息,第一章讲过,信息需要通过明确的信号表示出来。不同的时代,信息的表示方式不一样,19世纪和20世纪前半叶,采用的都是模拟信号方式,进入数字化时代后,开始采用数字信号方式。具体如表3-5所示。

表 3-5 协议的表示方式

模 拟	直流: 幅度、脉冲
	交流: 单频、双频、多频
数 字	面向字符
	面向比特
	面向文本

模拟方式下有直流信号方式和交流信号方式两种,直流方式下又分电压表示方式、脉冲表示方式,交流方式下又分单频、双频、多频方式。人们说话的声音、轮船的鸣笛声、体育课上的哨声,都是模拟信号。

数字方式下有面向字符、面向比特、面向文本3种方式。

面向字符的协议以ASCII编码为基础,以一个ASCII码为基本单位。早期的协议多采用这种方式,如BSC协议。

面向比特的协议以二进制码为基础,以一个比特为基本单位。目前绝大多数协议都采用这种方式,因为其效率最高。本书后续内容中可看到大量面向比特的协议。

面向文本的协议以单词为基本单位,接近人类自然语言的表达方式。其优点是简单、灵活,但其代价是效率比面向比特的协议低,如HTTP、SIP协议。

### 2. 协议的传递方式

通信网络都由多个节点组成,从一个节点到另一个节点需要经过多个中间节点的配合,协同完成整个通信过程。经过多个节点组成的网络,协议的传递方式共有两种:逐段转发方式和端到端对话方式。

逐段转发方式非常简单,就是从发送方开始逐个节点依次向后转发,直到最后的接收方。整个过程中,发送方只与第一个转发节点直接对话,并不与其他转发节点及接收方直接对话,如图3-17所示。

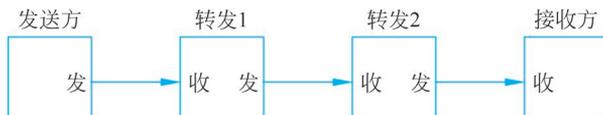


图 3-17 逐段转发方式

端到端对话方式是所有对话都是发送方与各个转发节点直接对话,转发节点的作用是帮助寻找下一站的方向、路由,为发送方和下一站建立通信链路,然后发送方再与下一站直接对话,直至最后与接收方直接对话,如图3-18所示。

在两种传递方式中,逐段转发方式,控制方法简单,各段可以采用不同的通信协议,缺点是每个转发点需要接收并转发全部通信内容,相对端到端对话方式而言,时延大;端

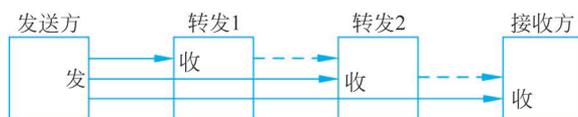


图 3-18 端到端对话方式

到端对话方式,控制相对复杂,且要求各段使用相同的协议,优点是各个转发点不需接收全部通信内容,只需要接收与路由相关的内容,相对逐段方式而言,时延小。这种方式在模拟通信时代应用较多,在当前数字通信时代,大都采用逐段转发方式,因为其简单和灵活。

### 3. 协议的应答方式

应答方式是指协议在通信过程中接收方对发送方做出的应答回应方式。在协议交互过程中,发送方发出一条消息,针对不同情况,接收方做出不同的回应,发送方会根据回应消息的不同做出不同的处理和不同的动作。回应的这个消息称为应答消息或者确认消息。回应消息属于后向消息(主动发起的消息称为前向消息),后向消息的种类往往不如前向消息多,但其作用巨大,起到控制协议流程的作用,因此协议的应答方式也称为协议的控制方式。

总体来说,具体的应答方式分为非互控、半互控、互控 3 种情况,如图 3-19 所示。

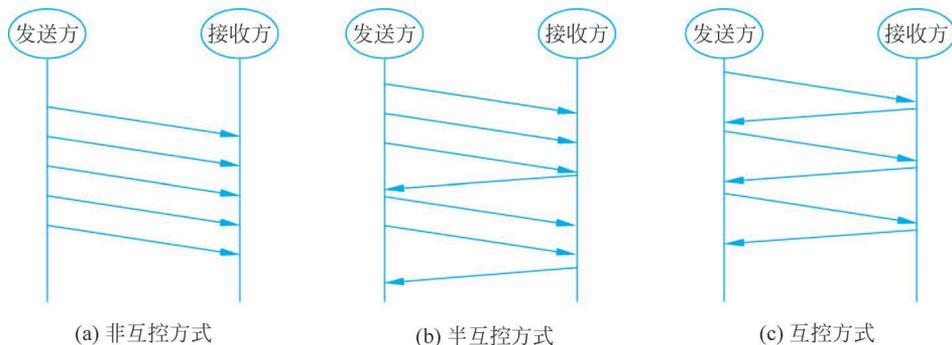


图 3-19 控制方式

#### 1) 非互控方式

发送方发送消息后,接收方不回送确认消息。类似生活中的短信,发送方不知道接收方是否正确接收,计算机网络中的 UDP 协议也是采用这种方式。总体来说,在对通信的可靠性要求不高的情况下,才会采用这种方式。

#### 2) 半互控方式

发送方陆续发送多个消息,接收方在收到多个消息后才回送一个确认消息。这种方式的效率比较高。与老师讲课类似,老师讲了很多内容,学生们才回应一次。

#### 3) 互控方式

发送方每发送一个消息,接收方都必须回应一个应答消息,发送方必须收到应答消息后,再根据应答消息的内容进行判断,再发送下一条消息。这种方式最可靠,但其效率最低。

(注：在表示方式为模拟信号的时代,还有一种全互控的方式,在数字时代已不再使用。)

应答消息又分为肯定消息、否定消息两大类。在半互控和互控方式中,有的协议只回应肯定消息,有的只回应否定消息,有的两种消息都回应。

协议的应答方式是协议中非常重要的一个内容,这里只是宏观地讲解了应答方式的种类,先建立整体认识。具体的控制方式如停止等待协议、连续 ARQ(Automatic Repeat-reQuest,自动重传请求)、选择性 ARQ 等将在后面的具体协议中去分析。

#### 4. 协议的实现要素

协议的第四个要件是大家最关注的一个要件,就是协议所要表达的具体内容,是各个协议重点描述的部分,主要有语法、语义、时序 3 个要素。

(1) 语法:指描述协议内容的具体结构或格式。类似中文里的“主谓宾”格式要求。

(2) 语义:指协议中各个信息的具体含义。类似中文里各个词语的具体含义。

(3) 时序:指实现某个事务所规定的消息顺序。类似描述一件事的语句顺序。

在协议的 4 个要件中,前面 3 个要件不在具体的协议内容之中,多在协议内容之外进行描述。在数字时代,表示方式默认为数字,传递方式默认为逐段传递,一些对可靠性要求不高的协议(如 UDP)的控制方式默认采用非互控方式,不再进行说明,因此前 3 个要件常常容易被忽略。但实际上,从协议本身的角度,它们都是协议的必备要件,不会因为采用默认方式而不重要。

### 3.4.3 协议的常用字段

所有的协议最终都通过帧结构来实现。协议的很多功能也体现在帧结构中,不同的协议有不同的功能,其帧结构也不同。协议种类太多,死记全部协议的帧结构意义不大,关键是抓住协议的普遍规律,先重点分析协议的几个必备字段,后面学习具体协议时,再结合这几个字段进行分析和理解。

#### 1. 收发地址

通信网络中的信息,都需要用收发地址,以指明通信双方的对象,指明信息的来源和目的地。在一些特殊情况下,如直连的两端进行通信时,可以省略地址字段。这只作为特例考虑。在面向连接的协议中(如虚电路),收发地址转化为逻辑信道号,可以看作是形式变换而已。

#### 2. 长度字段

协议帧的长度不可能无限长(对信令而言,还希望帧越短越好,可以减少信令时延),不同的协议,其帧长不一样(根据协议的功能来定),因此要指明其长度。长度字段的核心不是关心本帧有多长,重点是在复用的信道中界定哪些内容是自己的。

#### 3. 校验字段

为验证接收的信息是否正确,都设计有校验字段。具体校验的算法各有不同,有算术和、循环冗余算法等。

#### 4. 类型字段

协议一般传输多种类型的数据,通过类型字段来区分不同类型的帧。

### 5. 定界字段

数据链路层的协议,为了从复用的物理层提取自己的帧数据,还必须有定界字段。

需要强调的是,这些字段在不同的协议中,其具体的实现方法又不尽相同,因为技术的实现是灵活的。

比如有的同学在学 ATM 时,问为什么它没有长度字段。从表面上看,ATM 帧头中确实没有长度字段,这就涉及技术实现的灵活性。针对协议的长度字段,有两大类具体的实现方法:一类是明示法,在帧头中有明确的字段来指示,多数协议采用这种方式;一类是隐式法,如 ATM,它采用固定长度的帧结构,其长度不用在帧头中明示了,而是在其协议规则中事先约定了,ATM 帧头为 5 字节,数据部分为 48 字节。明示法又分为两种做法:一种是直接用一个长度字段,指明本帧的长度(具体指的内容,各个协议又有所不同,有的只指数据部分的长度,有的指整个帧的长度);另一种是用分隔符的方式来界定本帧的头和尾,从而界定其长度,类似文字中的句号,看到句号就知道这是本句的结束。

♥【技术思想启发】 技术是灵活的,实现相同的功能,不同的人、不同的时代有不同的做法。因此学习技术也要有灵活的思维,不能死记硬背。

## 3.5 网络的分层模型



视频

### 3.5.1 为什么要分层

随着通信技术和计算机技术的发展,网络和网络节点设备的功能越来越多,涉及面广,变得越来越复杂。当系统变得复杂后,一方面,设计和实现整个系统的难度增大,难以把控;另一方面,针对网络系统的交流、讨论和理解也很困难。解决复杂问题的基本思路就是“分而治之”,网络问题太复杂,于是采用分层方式将庞大而复杂的问题转化为若干小的问题,小的问题就比较容易研究和处理。这是网络分层的根本原因。

1977 年国际标准化组织(ISO)开始着手制定网络分层模型,并遵守以下原则:

- (1) 每层实现一个定义明确的功能,同一层中的各网络节点都有相同的功能。
- (2) 各层的功能相互独立,每层实现各自的功能和协议,实现方法对系统的其余层是透明的,各层所提供的服务与这些服务是怎么实现的无关。
- (3) 同一节点内相邻层之间通过接口进行通信,某一层的服务体现的是该层的一种能力,并通过接口提供给上一层。
- (4) 层和层之间的接口要清晰,跨越接口的信息量尽量少。
- (5) 各层之间相互配合,每一层使用下一层提供的服务,并向其上层提供服务,协同完成整个网络功能。
- (6) 不同节点只能在对等层之间进行通信。

1984 年 ISO 发布了开放系统互连参考模型(Open System Interconnection/Reference Model, OSI/RM)。OSI/RM 模型将整个网络结构分成 7 层,分别为物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层。

采用这种网络分层模型,带来很多好处,具体如下:

(1) 分层可将庞大而复杂的问题转化为若干较小的局部问题,而这些较小的局部问题就比较易于研究和处理。

(2) 清晰的分层参考模型便于复杂系统的问题定位,便于讨论不同组成部分之间的关联关系。

(3) 各层之间是独立的,可以根据各层的相关基础技术发展而独立发展,各层可以越做越专业。

(4) 每一层都是利用下层的服务来实现本层的功能,下层的服务可以提供给多个上层使用,可以实现各层功能的复用,提高了功能利用率,降低了不同技术之间的协同难度。

(5) 灵活性好,各层的技术发生变化,可以无损替换而不影响其他层。

(6) 结构上可以分割开,系统依赖性低。

(7) 模块化方式简化了系统的维护和升级,易于实现和维护,成本更低,灵活性更大。

(8) 能促进标准化工作。通过网络体系结构的标准化,可以统一各开发商的设计标准,实现协同开发,并允许不同厂家的产品相互通信,极大地促进了计算机网络的发展。

(思考:讲了这么多优点,大家想想,分层模型有没有缺点?有哪些缺点?)

网络分层之后,紧接着要解决的主要问题有以下3个:

- 每一层的功能是什么?
- 各层之间的关系是怎样的?各层之间如何进行交互?
- 通信双方的数据传输要遵循哪些规则?

后面分别对这些问题进行分析。

### 3.5.2 分层所引申的概念

当网络分为多个层次之后,必然带来一些新的术语和概念,如服务、接口、协议、N层、对等层、服务原语等,先对这些术语进行简单说明,以便更好地理解网络分层模型。

#### 1. N层、对等层

在网络分层模型中,各层完成各自的功能,上下层之间配合完成相应功能,为便于讨论,对所讨论的那一层称为N层,对其上一层称为N+1层,其下一层称为N-1层。不同主机上的同一个层次称为对等层,如图3-20所示。

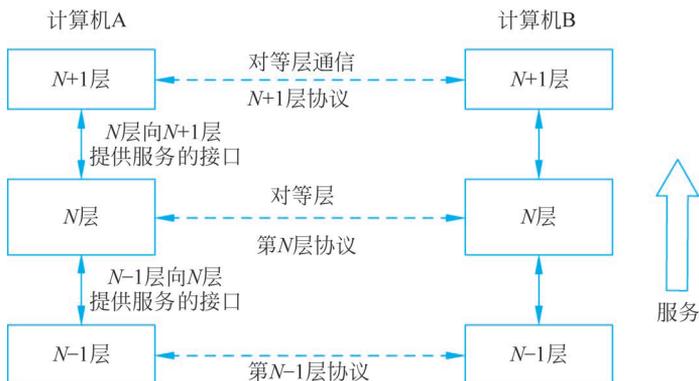


图 3-20 层、服务与协议的关系



视频

## 2. 对等层通信

OSI 模型规定,发送方与接收方只能在对等层之间进行通信,也就是源端的每一层只能与目的端的对等层进行通信,不能与其他层进行通信;同时,在每一层通信过程中,只能使用本层的协议进行通信,这种通信方式称为对等层通信, $N$  层的通信是通过  $N-1$  层的通信和  $N-1$  层的服务来实现的,如图 3-21 所示。可以看出,每一层都有自己的通信协议。

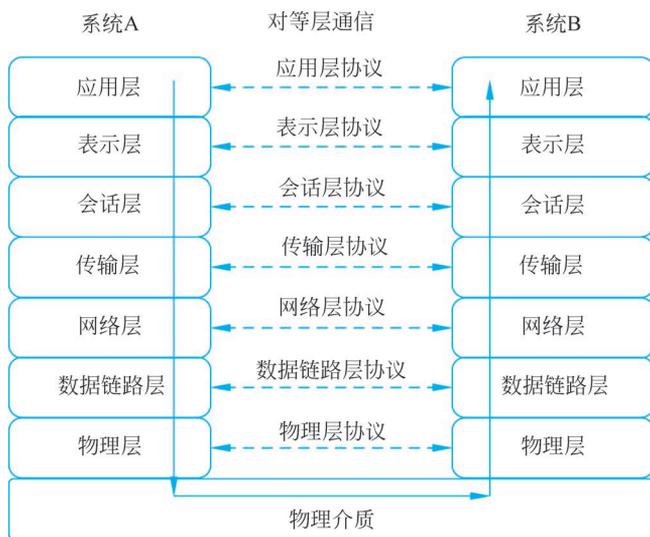


图 3-21 对等层通信

## 3. 服务、接口与协议

网络分层之后,首先是上下层之间相互配合,才能完成相应功能,服务就是上下层之间配合的内容。

服务是指某一层向它上一层提供的功能。任何一层都只为相邻的上一层提供服务,相邻的两层之间,下层为上层提供服务,上层使用下层提供的服务。如图 3-20 所示,第  $N$  层是  $N+1$  层的服务提供者,第  $N+1$  层是  $N$  层的服务用户,同时  $N$  层又是  $N-1$  层的用户。另外,第  $N+1$  层虽然只直接使用了第  $N$  层提供的服务,实际上它通过第  $N$  层还间接地使用到了第  $N-1$  层及其以下所有各层的服务。

服务虽然定义了各层应该做些什么,要提供哪些功能,但没有定义本层该如何工作,以及上一层该如何访问本层。

接口是指各相邻层之间相互配合的信息交互界面,是一个系统内部的规定。接口为  $N+1$  层提供了获取  $N$  层服务的逻辑接口。接口规定了有哪些参数可以使用,以及使用这些参数的结果是什么。

协议是各对等层之间的通信规程,它是各层服务功能的具体实现者。各层中的协议各自实现自己的功能,并不影响其他层。只有对等层之间才存在协议,非对等层之间不存在协议。

在  $N$  层和  $N+1$  层的接口处,由  $N$  层向  $N+1$  层提供服务。 $N$  层是服务的提供者, $N+1$  层是接受服务的用户。实际上, $N$  层的服务是通过  $N-1$  层向它提供的服务以及  $N$  层对等实体间按  $N$  层协议交换信息来完成的。接口处提供服务的地方称为服务访问点(Service Access Point,SAP)。

服务和协议常常被混淆(在 OSI 参考模型之前的很多网络并没有把服务从协议中分离出来,造成网络设计的困难)。在 OSI 模型中,二者是截然不同的两个概念。服务是网络体系结构中各层向它的上层提供的一组功能,通过一组原语(操作)来实现。尽管服务定义了该层能够完成的操作,但丝毫未涉及这些操作是如何实现的。服务描述两层之间的接口,下层是服务提供者,上层是服务用户。协议是一组规则,规定了同一层上对等实体之间所交换的数据包或者报文的格式和含义,协议涉及不同机器上两个对等实体之间发送的数据包。对等实体利用协议来实现它们的服务,只要不改变提供给上一层的服务和接口,对等实体可以自由地改变它们所使用的协议。服务存在于垂直方向的上下层之间,协议存在于横向的对等层之间。因此服务和协议是完全相分离的,这是一个关键概念。

#### 4. 服务原语

层间接口处的服务是通过一组服务原语来执行的,这些原语供用户实体访问该服务或向用户实体上报某事件的发生。OSI 模型中,将服务原语划分为 4 类,分别是请求(Request)、指示(Indication)、响应(Response)和证实(Confirm),如图 3-22 所示。

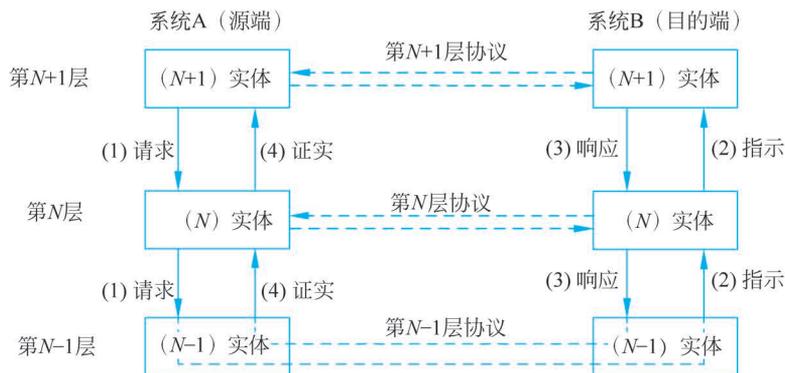


图 3-22 服务原语的位置

(1) 请求:首先发出的呼叫请求,用于高层向低层请求某种服务,即由服务用户发往服务提供者,请求它完成某项工作,如发送数据。其位置和方向是:源端( $N+1$ )实体 $\rightarrow$ 源端( $N$ )实体。

(2) 指示:用户实体被告知某事件发生,由服务提供者发往服务用户,指示发生了某些事件。如接收到一个远地送来的数据。其位置和方向是:目的端( $N$ )实体 $\rightarrow$ 目的端( $N+1$ )实体。

(3) 响应:用户实体对某事件的响应,由服务用户发往服务提供者,作为对前面发生的指示的响应。其位置和方向是:目的端( $N+1$ )实体 $\rightarrow$ 目的端( $N$ )实体。

(4) 证实:用户实体收到关于它的请求的答复,由服务提供者发往服务用户,作为对

前面发生的请求的证实。其位置和方向是：源端( $N$ )实体→源端( $N+1$ )实体。

4类服务原语完成相邻层之间的信息交互,完成上下层之间的服务请求和服务提供。在4类原语中,请求与证实是在请求方,指示与响应是在响应方,请求方与响应方之间则是通过对等层协议进行信息交互,如图3-23所示。

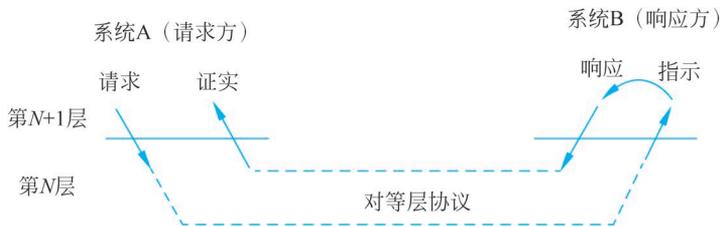


图 3-23 4类服务原语的通信关系

这4类服务原语是抽象的描述,具体系统中的功能各有不同。下面是一个使用服务原语的简单例子。

(1) 连接请求: 呼叫方服务用户请求建立一个连接。

(2) 连接指示: 连接请求通过服务提供者的对等层通信传到被叫方后,被叫方服务提供者向被叫方服务用户指示有建立连接的请求。

(3) 连接响应: 若被叫方服务用户准备建立连接,则通过此原语告诉本方服务提供者。

(4) 连接证实: 呼叫方服务提供者通过对等层通信得知被叫方同意建立连接后,由此原语告知呼叫方服务用户。

通过以上4步就建立了一条呼叫方与被叫方间的连接,可在其中传输数据。

(5) 数据请求: 呼叫方服务用户通过此原语请求本方服务提供者将数据送给被叫方。

(6) 数据指示: 被叫方服务提供者收到对方送来的数据后通知服务用户。

第(5)步和第(6)步可反复进行。

(7) 断连请求: 任何一方用户可通过此原语请求释放连接,由服务提供者传至对等方。

(8) 断连指示: 对等方服务提供者通过此原语告诉本方服务用户释放连接。

从上例可看到服务有证实的和非证实的之分,这与前面所讲的协议应答方式一致。连接服务是证实的服务,要使用请求、指示、响应和证实4类原语。数据传送服务和断连服务都是非证实的。只使用请求和指示两类原语。证实的服务需在对等方之间来回一次,花费的时间较多,但增加了可靠性。建立连接的服务通常都是证实的服务,被叫方既可同意建立连接,也可以拒绝建立连接。数据传送以及断开连接服务根据需要可采用证实的服务或非证实的服务方式。

## 5. SDU 与 PDU

服务数据单元(Service Data Unit,SDU),是层间接口服务之间传递的数据,是 $N+1$ 层与 $N$ 层之间传递的数据。 $N+1$ 层送到 $N$ 层的数据,称为 $N$ 层的SDU。

协议数据单元(Protocol Data Unit,PDU),是 $N$ 层协议实体之间传递的数据。

本层的PDU为下层的SDU,本层的SDU为上层的PDU。对某个子层来说,SDU是上层送到本层还没有被本层处理的数据,PDU是本层封装协议头后的数据,即“本层

PDU=本层 SDU+协议头”,如图 3-24 所示。

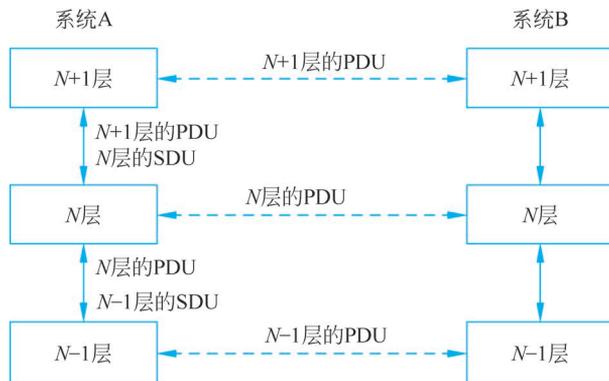


图 3-24 SDU 与 PDU

### 3.5.3 OSI 与 TCP 模型

开放系统互连参考模型(OSI/RM)是国际标准化组织的一个开放体系互连模型,定义了网络互连的七层结构。TCP/IP 协议体系结构是在 OSI/RM 基础上,专门针对 TCP/IP 网络而开发的体系互连模型,所以它既有 OSI/RM 的基本模型结构和层次划分思想,又针对了特定的 TCP/IP 网络,所以更加具体化,更加具有可操作性。TCP/IP 模型又有四层模型和五层模型,四层模型是将物理层与数据链路层合并为网络接口层,如图 3-25 所示。

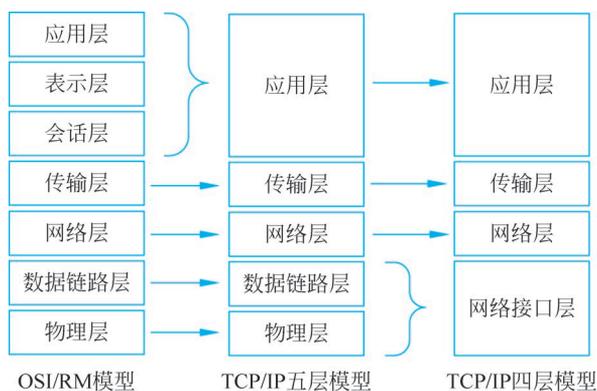


图 3-25 分层模型对比

3 种网络分层模型分层数量不同,但其分层思想是相同的,层次结构划分思想是相同的,总体层次结构也是相似的。

3 种模型有以下区别:

OSI/RM 是国际标准化组织在 1984 年制定的,不偏重任何特定的网络类型,是一个理想化的模型,具有最广泛的理论上的参考性。TCP/IP 协议体系结构起源于 20 世纪 60 年代末,由美国国防部高级研究规划署(DARPA)作为其研究的一部分,所以又称为 DARPA 参考模型。1983 年,DARPA 将 ARPAnet 上的所有计算机结构转向了 TCP/IP



视频

协议,并以 ARPAnet 为主干建立和发展了 Internet,形成了 TCP/IP 体系结构。TCP/IP 协议体系结构虽然不是国际标准,但它的发展和应用远远超过了 OSI/RM,成为 Internet 体系结构上的实际标准。TCP/IP 协议体系结构是针对 TCP/IP 协议进行功能分层和描述的,所以与协议的关系非常紧密。

层次结构上,TCP/IP 模型将会话层和表示层合并到应用层了,TCP/IP 四层模型进一步弱化了底层通信技术,不关心底层通信技术的具体实现,只关心底层通信技术所提供的接口,专注于网络的寻址和应用层信息的交互。或者说,四层模型弱化 CT 技术,突出 IT 技术,而 OSI/RM 模型是从理论上对各个功能进行划分,它具有更好的指导意义。

严格地说,TCP/IP 模型与 OSI/RM 模型中名称相同的各层,其功能也不是严格一一对应的,其功能分层有一定的调整。TCP/IP 模型中的网络传输层包含了 OSI/RM 模型的传输层和部分会话层功能;TCP/IP 五层模型中的数据链路层包含了 OSI/RM 模型的数据链路层和部分网络层功能。

OSI/RM 的网络层同时支持无连接和面向连接的网络通信;TCP/IP 模型的网络层只有 IP,只提供无连接的服务。

OSI/RM 参考模型本身并未确切地描述用于各层的协议和实现方法,而仅仅是明确了每一层应该完成的功能。实现这些功能的具体方法和标准,并不是模型的一部分,而是作为独立的国际标准而被发布。OSI/RM 参考模型是在其协议开发之前设计出来的,所以它不是基于某个特定的协议集设计的,它更具有通用性。另外,也意味着 OSI/RM 参考模型在协议实现方面存在某些不足,如它过于复杂。

可以说,OSI/RM 模型是通用的具有指导意义的学术模型,而 TCP/IP 是 OSI/RM 的一个具体的商业应用模型,是目前局域网、Internet 网络的实际标准。若无特殊说明,本书后面均按照 TCP/IP 五层模型来进行讨论。

### 3.5.4 各层的数据单元与核心目标

初学者往往觉得网络互连参考模型很抽象、很空洞,没有实际作用,但实际上,网络互连参考模型是建立网络的基础,是透彻理解网络的关键。因此,在学网络具体技术之前,不能只是死记硬背各层的名称,应该仔细理解网络互连参考模型,领悟其分层的思想,掌握各层的功能(也就是各层要达到的目的),理解各层的基本通信数据单元。抓住了各层的数据单元和核心目标,就抓住了顺藤摸瓜的“藤”,后面具体的技术以及技术的变化都是这个“藤”上的“瓜”,就容易理解和掌握了。如果不抓住“藤”,后面每一层出现的各种“瓜”及其变种,就容易出现“胡子眉毛一把抓”的尴尬情况。所以,先对各层的数据单元和核心目标进行分析。

首先,网络互连参考模型是对计算机网络体系结构的一种描述,它不是具体的网络实体,它描述的是在具体的通信介质之上、在不同的通信实体之间如何协同完成网络互联和信息互通的方法。因此网络互连参考模型不包含任何物理实体,特别是物理层,不是指物理的通信介质本身,只是描述介质的各种规范与要求,如接口尺寸要求、电气特性要求等。另外,网络互连参考模型也不能脱离物理介质而空谈,它是在物理介质的基础



视频

上,对各项网络互联功能的实现方法的描述。在图 3-26 中用实线分隔物理介质,表示网络互联模型在物理介质之上,但不包含物理介质。

其次,OSI/RM 模型的七层结构中,低 3 层和高 4 层分别针对不同的领域,低 3 层负责创建网络通信所需的网络连接,它是面向网络的,属于“通信子网”部分;高四层具体负责端到端的、与网络无关的用户数据通信服务,它是面向用户的,且只有网络终端才有高 4 层的功能,网络中负责转发的交换机、路由器等节点无需高 4 层的功能。在图 3-26 中用虚线加以分隔,表示它们既属于一个整体但又有所区别,是网络与用户的分隔点。



图 3-26 分层模型中的各层对象和功能

### 1. 物理层

物理层的通信对象是比特(bit),物理层的目的是尽量保障各个比特的可靠有效传输,向上一层提供比特流服务。通信领域中的很多技术都是为了可靠有效地传输信息比特,如信号处理、通信原理中的多种技术都是为了这个目的,也是通信领域最难的技术。OSI/RM 模型对物理层只规定通信设备的机械、电气、功能和过程的特性。如网络连接所需接插件的规格尺寸、排列情况,传输比特流时线路上信号电平的大小、传输速率、距离限制等。

### 2. 数据链路层

数据链路层的通信对象是数据帧(Frame),不再是单个比特。数据链路层的目的是在物理层提供比特流服务的基础上,保证相邻节点之间可靠有效地传输数据。

数据链路层以帧为单位进行数据传输,因此它首要的功能是数据成帧,通过成帧技术将物理层送来的孤立的比特封装在一起,表示是同一个站点的数据。为了保证数据的可靠传输,该层还具有数据的检错、重发、流量控制等功能。

在一些复杂的通信系统(如移动通信、Wi-Fi等)中,数据链路层又分为两个子层:介质访问控制子层(MAC)和逻辑链路控制子层(LLC)。介质访问控制子层处理介质资源

调度算法、数据出错校验、成帧等；逻辑链路控制子层位于介质访问控制子层之上，它屏蔽了各种介质访问控制子层的差别向其上层提供统一的数据链路服务，主要处理两个站点之间帧的交换，实现端到端的无差错的帧传输、应答功能以及流量控制功能。

### 3. 网络层

网络层的通信对象是数据包(Packet)。网络跨越的区域很广，并且是由多个子网连接而成，通信的两个终端之间可能会经过很多个数据链路段，也可能还要经过很多通信子网。数据链路层完成了相邻节点之间的数据传输，网络层的任务就是选择合适的网间路由，选择最优的路径确保数据及时传送到目的端。

网络的范围很大，拓扑结构很复杂，网络中流量也不平衡，要选择最优的路径实际是非常复杂的。

### 4. 传输层

传输层的数据单元称为报文段或数据报(TCP称报文段、UDP称数据报)，传输层提供端到端的逻辑通信，核心目的是为上层用户提供端到端的可靠和透明的数据传输服务，包含差错控制和流量控制等。传输层向高层屏蔽了下层数据通信的细节，使高层用户看到的只是在两个传输实体间的一条端到端的、可由用户控制和设定的数据通路。

注意，这里的数据报是指报文名称，前面还有一种交换方式也称数据报，在后续内容中要注意根据上下文语境来分析其具体含义。

传输层之下，从物理层到网络层都是逐段在通信链路上传输信息，从传输层开始是端到端的逻辑传输，这与低3层的通信有着本质的区别，虽然传输层的有些通信术语与低3层相同，但其含义完全不同，这一点需要在后面的学习中引起重视，注意理解其本质含义及各自的区别。

### 5. 会话层

会话层是一次通信的交互过程，也可以称为对话层，它负责建立、管理和终止表示层实体之间的通信会话。在会话层及以上的层中，数据传送的单位不再另外命名，统称为报文(message)，所以会话层的数据单元为报文。会话层之间的通信也属于逻辑通信，不参与各段的链路传输，它提供包括访问验证和会话管理在内的建立和维护各应用之间的通信机制。

### 6. 表示层

表示层解决用户信息的语法表示问题，它提供各种用于应用层数据的编码和转换功能，确保一个系统的应用层发送的数据能被另一个系统的应用层识别。例如，字符的表示、图像格式的显示、数据压缩和加密等，都是由表示层的协议来支持。

### 7. 应用层

应用层是参考模型中最靠近用户的一层，为操作系统或网络应用程序提供访问网络服务的接口，也为用户直接提供各种网络服务。

值得强调的是，各层中的数据单元名称，不同的书有不同的叫法，容易混淆，物理层、

数据链路层、会话层、表示层、应用层的名称比较统一,无歧义。容易引起混淆的是传输层和网络层。传输层的数据单元名称最混乱,编者查阅了多本中文和英文经典网络书籍,有的不区分 TCP 和 UDP,都称 Segment,有的分为 Segment 和 Datagram,中文有数据报、数据段、报文段几种称呼。多数书籍还是区分 TCP 和 UDP 的名称,一般 UDP 中称数据报(Datagram),TCP 有称数据段、有称报文段的。

本书约定,只针对 PDU 命名,在传输层约定 **UDP 中的 PDU 为数据报(Datagram)**、**TCP 的 PDU 为报文段(Segment)**。

这里对本书后续各层的 PDU 名称统一为表 3-6 所示的名称。

表 3-6 各层中的数据单元名称

OSI 模型层	协议单元名称
应用层、表示层、会话层	报文(message)
传输层	TCP: 报文段(segment) UDP: 数据报(datagram)
网络层	数据包(packet)
数据链路层	帧(frame)
物理层	比特(bit)

### 3.5.5 分层模型下节点间的通信过程

在 OSI/RM 网络互连模型下,网络体系结构被分为 7 层,这里从通信过程的角度,看看网络中两个通信节点之间的信息是如何在各层和各节点之间传递的。图 3-27 指示出网络节点的分层结构,以及网络中终端节点的信息是如何通过网络传输到另一个终端节点的通信过程。图 3-27 中用交换机和路由器两种典型的网络设备作为网络中间节点的通信过程,实际网络中节点比这个更多,但原理是一样的。

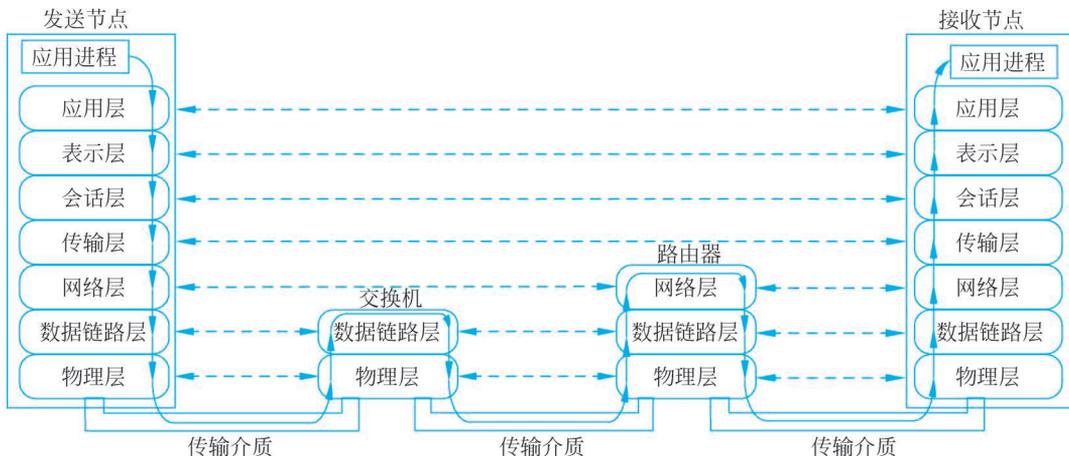


图 3-27 分层模型下的通信过程

### 1. 分层模型下的网络结构

从图 3-27 中可以看出,只有终端节点中才具备 OSI/RM 模型的完整 7 层,网络中的路由节点只有模型中的低 3 层,也就是网络内部只有通信子网,最多只有低 3 层的通信功能。终端节点是面向终端用户的设备,才具有高 4 层的功能。另外,从图 3-27 中也可以直观地看到,信息传递过程中,低 3 层是逐段转发的,各个节点是有物理设备的,高 4 层是端到端的,是逻辑化的抽象连接。这是理解网络分层模型的全局认识,非常重要,影响后面很多内容的正确认识和理解。

### 2. 分层模型下的数据传输过程

有了前面的整体认识,然后再从微观角度看看信息的流动方向。数据发送方将信息发送到数据接收方时,数据发送方中的程序需要将信息先发送到其应用层,加上应用层的封装头,然后将信息发送到表示层,加上表示层的封装头,再将数据转送到会话层,加上会话层的封装头,再往下逐层传递,直至物理层,变成比特流,然后再调制到物理介质上,变成模拟电信号在物理介质上传输。

电信号通过物理介质送到其端点设备上(如图 3-27 中的交换机),交换机物理层将物理介质上的电信号转换为比特流,然后送到数据链路层,数据链路层解包后找到下一跳的节点地址,交换机更换节点地址,封装成帧后送往物理层,再调制到物理介质上。物理信号通过传输介质到达下一站的路由器,路由器又经过物理层、数据链路层、网络层逐层接收和解包分析,路由器在网络层通过目的地址和路由表找到终端节点的地址,再依次封装后,送到传输介质上。终端节点的物理层将物理介质上的电信号转换为比特流,然后送到数据链路层,解包后再送到网络层,网络层解包分析后再送到传输层,传输层解包后送到会话层,会话层解包后送到表示层,表示层解包后送到应用,应用层解包后最后送到接收方的应用进程,从而完成这个信息的传递。

在整个通信过程中,数据的流动方向是:在发送方是自上而下传输的,在接收方是自下而上传输的,如图 3-27 中的实线所示。但协议之间的对话只能在通信双方的对等层之间进行,如图 3-27 中的虚线所示。

这只是一个粗略的信息流动过程,目的是建立信息流的宏观认识。在每个点上的每一层,除了封包和解包之外,还有很多其他事情要做,如有的做检错、纠错,有的做路由选择,有的做地址转换,有的做连接管理,有的做流量控制等,具体将在后面各章详细分析。

### 3. 各层中的协议数据封装

在整个数据传输过程中,数据在发送方经过各层时都要附加上相应层的协议头(数据链路层还需要封装“协议尾”),也就是各层要对数据进行协议封装,以标识对应层所用的通信协议。

“协议头”是用来封装本层 SDU 的,“协议尾”则代表本层封装的结束,封装后形成本层的 PDU。图 3-28 中左边箭头所示的顺序就是 OSI/RM 各层的数据封装流程,其中的 AH 为应用层协议头,PH 为表示层协议头,SH 为会话协议头,TH 为传输层协议头,NH 为网络层协议头,DH 为数据链路层协议头,DT 为数据链路层协议尾。

在接收方,数据是由低层向高层传输的,当数据到达某一层后,就会去掉对应下层的协议头,这个过程是一个解封装的过程,是前面协议封装的逆过程,顺序如图 3-28 中右边箭头所示。因为上层并不需要了解它的下层服务,所以当包或帧送到某一层时就会把下一层的协议头去掉,还原该包或帧在发送方对应层时的包或帧内容。加上协议头的作用可以理解为在发送方要一层层地加上一个指明到达下层地址的信封,而在接收方则要一层层地拆开信封,以获取向上层传输的地址信息,使数据能继续向上层传输。

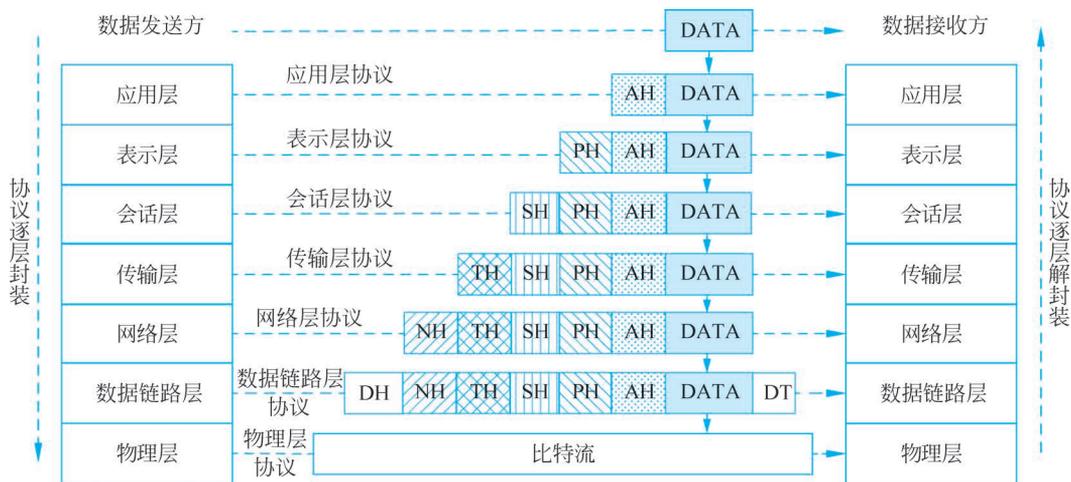


图 3-28 各层的数据封装示意过程

### 3.5.6 分层思想的讨论

首先,从 OSI 模型和 TCP/IP 模型的不同,可以感受到分层模型不是固定的,分层模型只是一种思想,是解决复杂问题的一种思路和方法。但具体怎么分,分多少层,是根据具体问题具体分析,不能死板地认为只能为 7 层或 5 层。

这种思想不仅在计算机网络中有,现实生活中也到处存在,生活中的分工协作就是分层模型的另一种体现,姑且称之为社会 OSI 模型。以吃的面食为例,从制种、种植、收割、粗加工、精加工,到超市的面粉,最后到餐桌上可直接食用的包子馒头,多个环节,多个层次,相互配合,分工合作而成。

其次,理解了这种思想,可以灵活应用,可以设计不同于 TCP/IP 5 层模型的新通信分层模型。通信涉及的范围广、领域多、技术种类多,通信技术越来越复杂,都会按照分层模型进行设计和实现,但不同的技术具体的分层结构和各层的功能都不完全相同。如 Bluetooth、USB、Zigbee、Wi-Fi、4G、5G 等。

最后,理解了分层思想,特别是社会 OSI 模型,可以应用这个思路解决一些问题,为解决实际问题提供思考的角度,寻找解决问题的一些方向。

#### ♥【技术思想启发】

1. 不同的系统有不同的网络分层模型,其核心是“具体情况具体分析”,设计不同的模型。中国特色社会主义也是结合具体情况具体分析,中国有独特的历史、独特的文化、



视频

独特的国情,必须坚持走中国特色社会主义道路。

2. 从网络分层模型中体会“专业化、分工合作、共享复用”的理念,体会社会分工协作模型,以及分工合作中的专业精神、追求卓越的精神。

## 【本章实验】

1. 打开手机上的秒表,用最快的速度启动和停止秒表的计时功能,查看你自己最快的反应时延,并与其他同学比较。再想想网络的时延指标在什么范围,有何感性认识。

2. 关于时分复用的思想实验:假设某学校有 10 间教室,每间教室每天可安排 8 节课,分以下几种情况结合时分复用原理讨论如何分配教室。

(1) 学校有 10 个班,每个班每天有 4 类课,每类 2 节课,由教务处安排课表。

(2) 学校有 20 个班,每个班每天有 2 类课,每类 2 节课,由教务处安排课表。

(3) 学校有 20 个班,每个班每天有 2 类课,每类 2 节课,没有教务处安排课表。

(4) 学校有 20 个班,每个班每周有 6 类课,每类课每周 2~4 节课,没有教务处安排课表。

## 【本章小结】

随着通信技术的发展和广泛应用,通信网络的种类也越来越多,从不同的角度看网络,也出现多种分类方法。抛开具体的网络分类,任何网络的基本要素都包含网络设备、设备之间的通信协议、设备组网的拓扑结构、网络编址方式。不同的网络有不同的设备、不同的通信协议、不同的拓扑结构和不同的编址方式。网络的质量通过多种性能指标来刻画,主要包括九大指标,其中特别要注意区分各类时延指标并能进行运用分析。

交换方式是网络的核心,目前共有 3 种交换方式(或者说是交换思想),电路交换、报文交换和分组交换,分别对应语音业务、电报业务、数据业务而设计。其他交换技术都是在这 3 类交换方式上派生出来的具体技术,因此学习时抓住这 3 类交换方式就抓住了根本。报文交换的应用现已很少,主流的是电路交换和分组交换。电路交换的核心是独占物理链路,因此具有时延小的优点,也有带宽固定的弱点(相对于数据通信而言);分组交换的核心是共享物理链路,牺牲了时延,但带来了可变带宽的优势,非常适合突发率高的数据业务。

通信协议是网络的神经系统,没有通信协议,整个网络就无法工作。不同的网络有不同的功能,也有不同的通信协议,因此通信协议的种类繁多。但所有的通信协议都要从 4 方面去设计和描述,分别是协议的表示方式、传递方式、应答方式和实现要素。

由于实际的网络运行影响因素众多且往往具有随机性,变化纷繁复杂,因此,网络协议的设计是很复杂的。对复杂工作往往采取分而治之的方法来解决,因此,通常将网络分解为多个层次,不同的层次实现不同的功能,各自细化,又相互配合,协同完成整个网络的运行。这是解决复杂问题的基本思想,可以应用在很多地方。具体的网络分层方式又有很多种,具有代表性的是国际标准化组织的 OSI 七层模型和商用的五层模型。

### 【知识对接】

1. 电话号码的编址方式与生活中的哪些编号规则类似?
2. 在日常生活中,汽车的灯光语言、交警的指挥手势、舰艇上的旗语与机器之间的通信协议有哪些异同?
3. 将 OSI 分层的思想扩展到社会分工中,有哪些实例?

### 【扩展阅读】

1. 分组交换: <http://www.kepu.net/vmuseum/technology/telecom/switch/swt901.html>
2. 交换方式: <http://www.kepu.net/vmuseum/technology/telecom/switch/swta02.html>
3. OSI 模型: [https://blog.csdn.net/qq\\_36756682/article/details/104112765](https://blog.csdn.net/qq_36756682/article/details/104112765)

### 【思考题】

1. 不同的网络拓扑,对网络资源和通信方式带来哪些影响?
2. 网络编址要考虑哪些因素?
3. 电路交换对链路的独占性带来哪些优点和哪些缺点?
4. 分组交换对链路的共享性带来哪些优点和哪些缺点?
5. 为什么网络必须要通信协议?设计通信协议时要考虑哪些问题?
6. 网络为什么要进行分层设计?分层思想给你哪些启发?

### 【习题】

1. 常见的网络分类方式有哪些?结合现实生活中的情况,理解不同分类方式下的各组成部分。
2. 网络的几种基本拓扑结构有哪些?比较它们的优缺点,举例说明选择各种拓扑的考虑因素和应用场景。
3. 为什么需要网络编址?网络编址方式有哪些?结合现实生活中的例子加以描述。
4. 理解电路交换和分组交换的工作过程,用自己的语言归纳总结电路交换与分组交换的异同点(从5个以上的角度进行对比),试用生活中的某些活动来类比电路交换、报文交换、分组交换。
5. 电路交换和分组交换分别适合哪些业务?为什么?
6. 从多个角度比较虚电路与电路交换的区别。
7. 理解不同交换方式的本质是对链路资源的利用方式不同,并说明各种交换方式的资源利用方式分别是什么。
8. 什么是逻辑信道?逻辑信道号怎么使用?
9. 什么是通信协议?网络中为什么需要协议?通信协议的特点是什么?理解信令与协议的异同点。

10. 协议四要件包括哪些? 各有什么含义? 分别应该怎么做?
11. 为什么要使用分层的网络体系结构? 结合现实生活中的例子, 说明分层的好处。
12. 什么是服务、接口、协议、对等层、服务原语?
13. 什么是服务数据单元(SDU)和协议数据单元(PDU)? 这两者的关系是什么?
14. 理解 OSI/RM 模型、TCP/IP 网络体系结构的要点和各层的主要功能, 并用自己的话描述各层的主要作用、核心目标。
15. 试描述分层模型下的数据传输过程。
16. 假设主机 A 要向主机 B 发送大小为  $10^7$  b 的数据, 两个主机的路径上要经过两个交换节点(即三段链路), 其速率分别是 50Mb/s、20Mb/s 和 10Mb/s, 且每段链路上的传播时延为 10ms。忽略所有的处理和排队时延。如果连接建立时延为 100ms, 每个分组大小为 1000b(忽略分组首部), 试着计算采用电路交换、报文交换、数据报分组交换和虚电路交换方式的时延。从时延的角度比较这几种交换方式的优缺点。
17. 上网查阅 OSI 模型的相关资料, 撰写一篇文章, 总结你对 OSI 模型的认识。
18. 计算机网络中常用的性能指标有哪些? 作用和现实意义是什么?
19. 计算机网络中总时延由哪些部分构成? 各自在什么情况下产生? 哪种时延有可能为零? 为什么?
20. 假设主机 A 要向主机 B 发送 80B 的数据, 在传输过程中, 需要加上 20B 的传输层首部和 20B 的网络层首部, 在交给以太网传送时, 还需要加上数据链路层的首部和尾部, 共 18B, 请问数据的传输效率是多少? 如果数据长度为 1200B 时, 传输效率又是多少呢?
21. 在长度为 10km 的点对点链路中, 若传播速率为  $2 \times 10^8$  m/s, 带宽为 2Mb/s, 现在要发送 100B 的分组, 请问发送时延和传播时延分别是多少? 如果分组大小为 1024B, 结果又是多少呢?