

第1章 概述

本章是整本书的概览。首先介绍计算机网络在信息时代的各类应用，以及带来的一些负面问题；接着对因特网进行概述，包括网络、互联网和因特网的相关基本概念，因特网发展的三个历史阶段，因特网的标准化和管理机构，因特网的组成（边缘部分和核心部分）；之后介绍因特网核心部分采用的基于存储转发技术的分组交换方式；在介绍过计算机网络的定义和分类以及八个主要性能指标后，详细讨论贯穿全书的重要概念——计算机网络的体系结构；最后，简要介绍计算机网络在我国的发展历程以及我国互联网发展情况相关资料的获取方法。

本章重点

- (1) 基于存储转发技术的分组交换方式。
- (2) 计算机网络的一些重要性能指标（带宽、时延、往返时间、利用率等）。

(3) 计算机网络的体系结构及其相关术语。这部分内容比较抽象。对于计算机网络初学者，在短时间内很难完全掌握这些抽象的概念。但这些抽象概念又能指导后续的学习，因此必须从这些概念学起。建议读者在学习这部分内容时不要钻牛角尖，对于实在搞不懂的抽象概念暂时放过去，在学习到后续章节时，时常复习一下本章中的这些概念。当读者学习完整本书后就能体会到，计算机网络的体系结构不再抽象难懂，它的分层思想是多么优美的设计哲学，其中的这些术语又是多么贴切。

1.1 信息时代的计算机网络

随着信息技术、计算机技术和通信技术的迅猛发展和密切结合，计算机网络已成为21世纪这个信息时代的核心。以因特网（Internet）为代表的计算机网络已悄然改变了人们的生活、学习、工作甚至思维方式，并对国民经济、国家安全、社会稳定等方面产生着巨大影响。在本节中，我们来一起聊聊身边丰富多彩的各类网络应用，同时也反思一下计算机网络在给人类带来极大便利的同时，还带来了哪些不和谐的因素。



1.1.1 计算机网络的各类应用

毫不夸张地说，计算机网络已经融入了我们生活的方方面面，它已成为我们生活中不可或缺的一部分。我们生活中丰富多彩的网络应用大致可以分为信息浏览和发布、通信和交流、休闲和娱乐、资源共享、电子商务、远程协作、网上办公等几个类别，如图1-1所示。

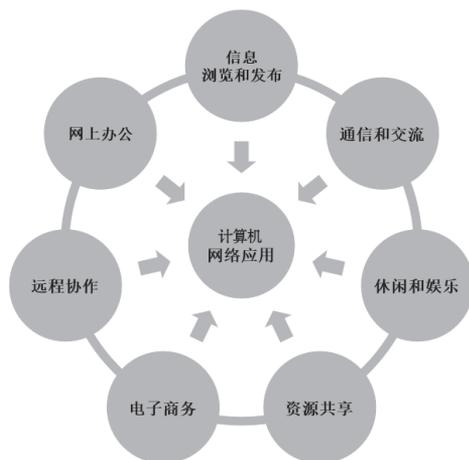


图1-1 常见的计算机网络应用

相信大家每天都会使用上述网络应用类别中的某些具体应用。例如浏览各类万维网网站；使用谷歌、百度等搜索引擎搜索感兴趣的信息；通过个人网站、博客和微博等平台记录和发布信息；通过电子邮箱发送和接收电子邮件；通过QQ、Skype和微信等通信工具进行即时通信；在哔哩哔哩、YouTube等视频网站上发布自己的vlog、观看感兴趣的视频；通过网络云盘进行资源共享；通过各类电子商务平台进行网上购物、网上转账和网上打车；通过各类慕课平台进行在线学习；通过校园网进行网上选课、评教评学和科研项目申报；通过政府部门的电子政务系统进行在线咨询、网上申报、证件申领、投诉和举报等。

计算机网络的应用不胜枚举，很难想象如果某一天计算机网络突然从我们的生活中消失，我们的生活将会变得怎样。

1.1.2 计算机网络带来的负面问题

毫无疑问，计算机网络已经彻底改变了我们的生活。然而，计算机网络在给我们带来极大便利的同时，也带来了一些负面的问题，如图1-2所示。



图1-2 计算机网络带来的负面问题

黑客利用网络窃取国家机密、传播计算机病毒、肆意攻击正规网站，不法分子在网络上实施诈骗、建立各种色情网站和赌博网站来牟利，某些电子商务平台上的不良商家通过网络售卖假冒伪劣商品，网络使用者有意或无意地传播形形色色的谣言……但是，计算机网络给我们生活带来的正面影响远远超过其负面问题。

因特网之父温顿·瑟夫曾说过：“既然你无法逃避接触因特网，那么为何不去了解它并且使用它呢？”没错，既然我们无法避免使用计算机网络，那么为何不去了解它并使用它呢？

1.2 因特网概述

对于普通的计算机网络用户而言，接触最多的计算机网络就是因特网，它是当今世界上最大的计算机网络。在本节中，首先介绍网络、互联网与因特网的区别与关系，然后简单介绍因特网的发展历程、标准化工作和管理机构以及因特网的组成，以便读者对计算机网络有一个初步的了解。



1.2.1 网络、互联网与因特网的区别与关系

1. 网络

网络（Network）是由若干**节点**（Node）和连接这些节点的**链路**（Link）组成的，如图1-3所示。网络中的节点可以是计算机（笔记本电脑、台式电脑、服务器等）、网络互连设备（集线器、交换机、路由器等）、其他具有网络功能的设备（网络打印机、网络摄像头、物联网设备等）。网络中的链路既可以是**有线链路**，也可以是**无线链路**。

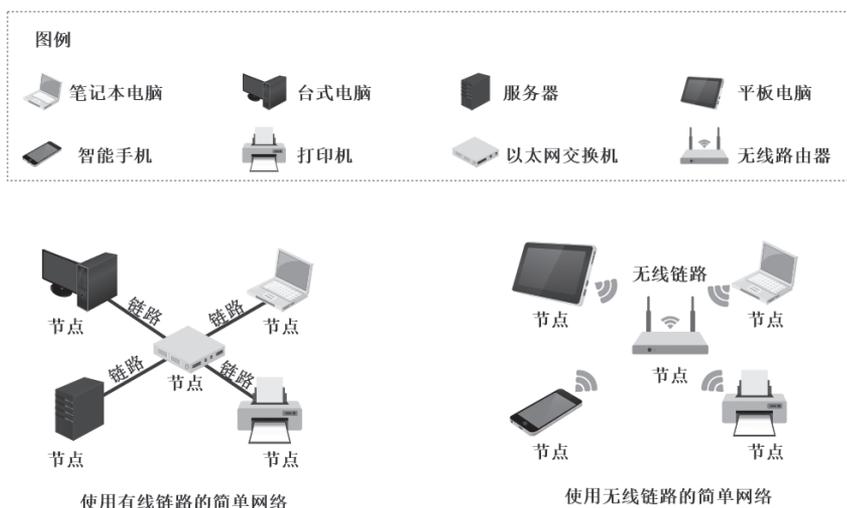


图1-3 简单的网络示意图

为了简单起见，我们可以仅用一朵云来表示一个网络，而网络内部的细节则不用给出，如图1-4所示。在今后研究网络互连的相关问题时，这样的做法可以带来极大的便利。

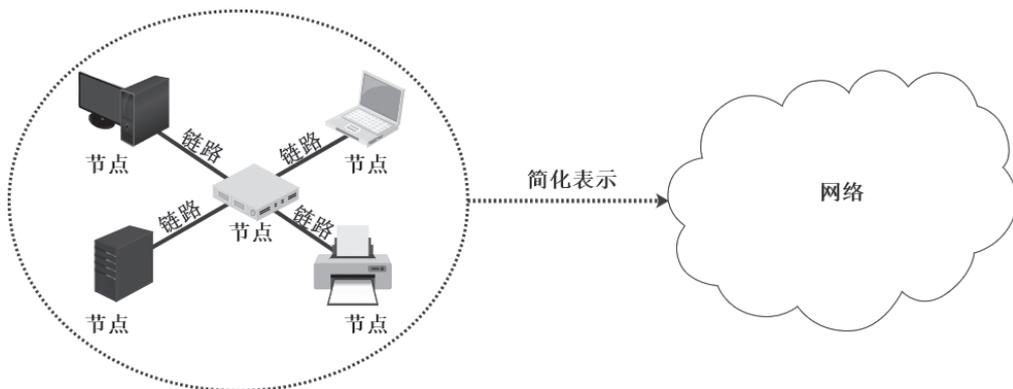


图1-4 单个网络的简化表示

2. 互联网

互联网（internet）是由**若干网络**和连接这些网络的**路由器**组成的，如图1-5所示。如果我们忽略互连细节，则可将互联网看作一个覆盖范围更大的网络，因此也可称其为“**网络的网络**（Network of Networks）”。为了简单起见，互联网也可用一朵云表示。

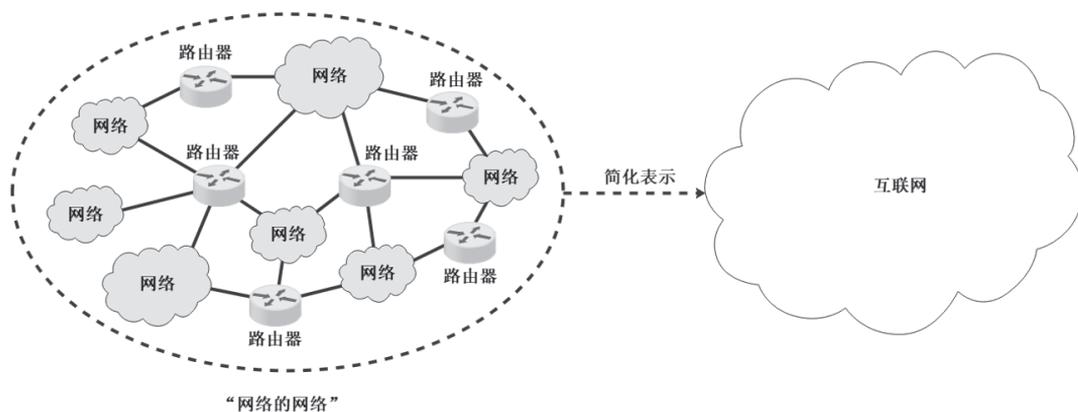


图1-5 互联网示意图

3. 因特网

因特网（Internet）是我们几乎每天都会使用的网络，它是当今世界上最大的互联网，其用户数以亿计，互连的网络数以百万计。因特网也常常用一朵云来表示，其内部各种路由器和异构型网络的互连细节不用给出（一般也难以给出），如图1-6所示。连接在因特网上的各种通信设备（例如智能手机、平板电脑、笔记本电脑、台式电脑、服务器、网络打印机和可联网家用电器等）称为**主机**（Host），而**路由器**是用于网络互连的专用设备，一般不称其为主机。

综上所述，我们可以将网络、互联网与因特网的区别与关系总结如下：**若干节点和链路互连形成网络，而若干网络通过路由器互连形成互联网，因特网是当今世界上最大的互联网。**

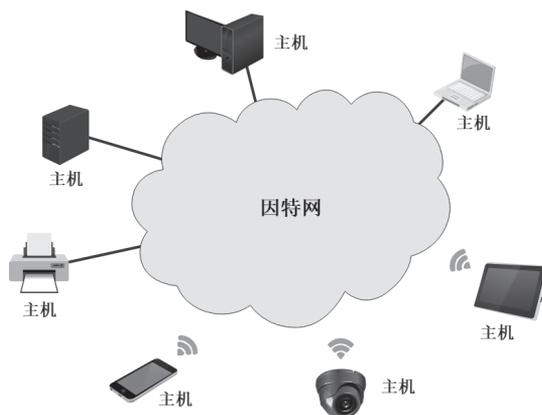


图1-6 因特网示意图

请读者注意以下几点：

- 我们有时并没有严格区分互联网和因特网这两个名词，许多人口中的互联网实际上是指因特网。但internet和Internet这两个英文名词却有很大的区别：
 - **internet**的意思是互联网，它是一个通用名词，泛指由多个计算机网络互连而成的网络。在这些网络之间可以使用任意的通信协议作为通信规则。
 - **Internet**的意思是因特网，它是一个专用名词，专指当前全球最大的、开放的、由众多网络和路由器互连而成的特定计算机网络。在这些网络之间必须使用TCP/IP协议族作为通信规则。
- 网络互连并不仅仅是简单的物理连接，还需要各通信设备中安装有相应的软件。因此当我们谈到网络互连时，就隐含地表示在这些通信设备中已经安装好了相应的软件，因而各通信设备可以通过网络交换信息。

1.2.2 因特网的发展历程

因特网是冷战的产物之一。1962年，美国国防部为了确保美国军事力量在遭受苏联第一波核打击后，仍具有一定的生存和反击能力，决定设计一种基于**分组交换技术**的通信指挥系统。1969年，美国国防部创建了**第一个分组交换网ARPANET**，该网络就是因特网的雏形。

因特网的基础结构大体上经历了三个阶段的演进，如图1-7所示。



图1-7 因特网基础结构的演进过程

1. 从单个分组交换网向互联网发展

ARPANET最初只是一个单独的网络。到了20世纪70年代中期，人们意识到不可能只用一个单独的网络来解决所有的通信问题，于是开始研究网络互连问题。1983年**TCP/IP协议族**成为ARPANET上的标准协议，任何使用TCP/IP协议族的计算机都能通过网络互连而通信，因此**1983年成为因特网的诞生时间**。1990年ARPANET的实验任务完成，正式宣布关闭。

2. 逐步建成三级结构的因特网

从1985年开始，美国国家科学基金会围绕6个大型计算机中心建设**国家科学基金网NSFNET**。它由**主干网、地区网和校园网**三级结构组成，覆盖美国主要的大学和研究所，成为因特网的主要组成部分。从1991年开始，全球许多公司纷纷接入因特网，美国政府决定将因特网的主干网转交给私人公司经营，对接入因特网的单位进行收费。

3. 逐步形成多层次ISP结构的因特网

从1993年开始，NSFNET逐步被多个商用的因特网主干网替代，政府机构也不再负责因特网的任何运营，转而是由各种**因特网服务提供者**（Internet Service Provider, ISP）来运营。任何单位或个人都可以通过ISP接入因特网，只需要按ISP的规定交纳费用即可。

我国的ISP主要有中国电信、中国移动以及中国联通这三大电信运营商，它们向广大用户提供因特网接入服务、信息服务和增值服务，如图1-8所示。

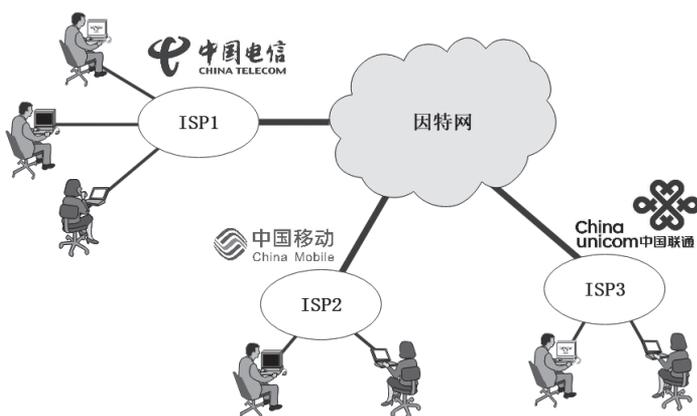


图1-8 用户通过ISP接入因特网

1994年，最早由欧洲粒子物理实验室的蒂姆·伯纳斯-李在1989年提出的**万维网**（World Wide Web, WWW）技术在因特网上被广泛应用，这使得众多普通的计算机用户可以便捷地使用网络，极大地推动了因特网的迅猛发展。1995年，NSFNET停止运作，因特网彻底商业化。

目前，**因特网已发展成基于ISP的多层次结构的互连网络**，没有人能够准确说出因特网究竟有多大，其整个结构也很难进行细致的描述。图1-9给出了一种具有三层ISP结构的因特网概念示意图，三层ISP分别为：

- 第一层ISP是**国际级**的，其覆盖面积最大并且拥有高速链路和交换设备。第一层ISP之间相互连接构成因特网主干网（Internet Backbone）。
- 第二层ISP是**区域级或国家级**的，与少数第一层ISP相连接，作为第一层ISP的用户。一些大公司也是第一层ISP的用户。
- 第三层ISP是**本地级**的，与第二层ISP相连接，作为第二层ISP的用户。普通的校园网、企业网、住宅用户以及移动用户等，都是第三层ISP的用户。相同层次的ISP也可选择直接相连。

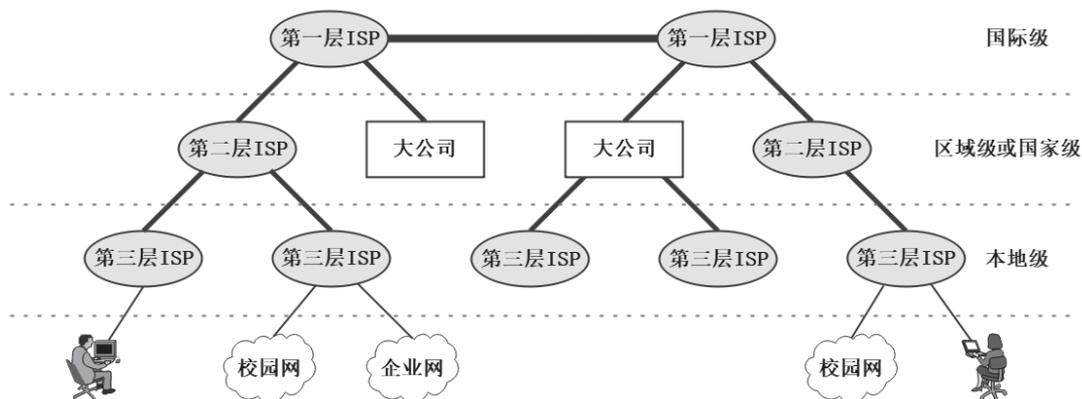


图1-9 三层ISP结构的因特网概念示意图

请读者注意，已接入因特网的用户也可以成为一个ISP。他只需要购买一些相关的设备（例如调制解调器、路由器等），让其他用户能够通过他来接入因特网。因此，因特网的结构实际上是基于ISP的多层次结构，各ISP可以在因特网拓扑上添加新的层次和分支。

1.2.3 因特网的标准化工作和管理机构

1. 因特网的标准化工作

在因特网的发展过程中，标准化工作起到了非常重要的作用。如果没有国际标准，将会导致多种技术体制并存且互不兼容，这会给用户带来极大的不便。试想一下，如果手机的充电接口五花八门，这将是多么糟糕的事情。同理，网络互连设备（交换机或路由器等）的接口如果没有统一的标准，也就很难进行网络互连。

因特网的标准化工作是面向公众的，其任何一个建议标准在成为因特网标准之前，都以RFC技术文档的形式在因特网上发表。**RFC**（Request For Comments）的意思是“请求评论”。任何人都可以从因特网上免费下载RFC文档（<http://www.ietf.org/rfc.html>），并随时对某个RFC文档发表意见和建议。

制定因特网标准需要经过**因特网草案**（Internet Draft）、**建议标准**（Proposed Standard）、**草案标准**（Draft Standard）、**因特网标准**（Internet Standard）这4个阶段，如图1-10所示。

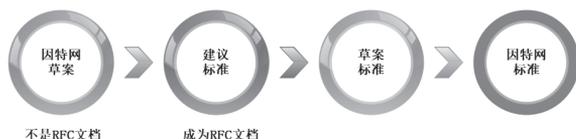


图1-10 制定因特网标准需要经过4个阶段

需要说明的是，由于“草案标准”容易与“因特网草案”混淆，所以从2011年10月起取消了“草案标准”这个阶段[RFC 6410]。这样，现在制定因特网标准的过程简化为：“因特网草案”→“建议标准”→“因特网标准”。

2. 因特网的管理机构

因特网管理机构的组织架构如图1-11所示。因特网由国际组织**因特网协会**（Internet Society, ISOC）全面管理。ISOC下设**因特网体系结构委员会**（Internet Architecture Board, IAB），负责管理因特网相关协议的开发。IAB下设**因特网工程部**（Internet Engineering Task Force, IETF）和**因特网研究部**（Internet Research Task Force, IRTF），其中IETF负责研究中短期的工程问题、相关协议的开发和标准化；IRTF负责研究理论方面的需要长期考虑的问题。

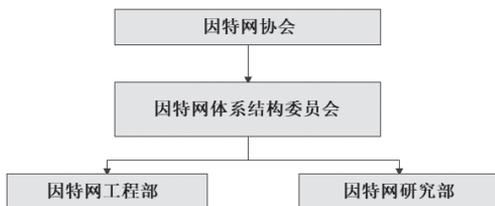


图1-11 因特网管理机构的组织架构

1.2.4 因特网的组成

因特网是当今全球覆盖范围最广的互联网，其网络拓扑非常复杂，但我们可以从功能上简单地将其划分为如图1-12所示的两部分：

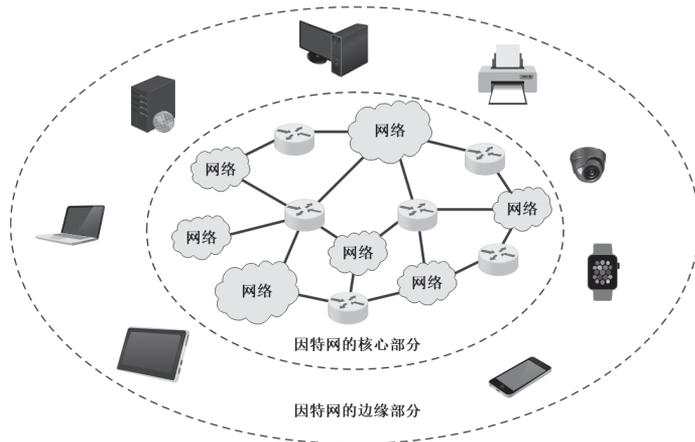


图1-12 因特网的边缘部分与核心部分

- 因特网的**边缘部分**。由连接在因特网上的台式电脑、笔记本电脑、平板电脑、服务器、智能手机、智能手表、网络摄像头和网络打印机等用户设备构成。这些用户设备常称为**主机**，由用户直接使用，为用户直接提供各式各样的网络应用。
- 因特网的**核心部分**。由**大量异构型网络**和连接这些网络的**路由器**构成。因特网的核心部分为其边缘部分提供**连通性**和**数据交换**等服务。

1.3 电路交换、分组交换和报文交换

路由器（Router）在因特网核心部分中发挥着至关重要的作用，它对收到的分组进行**存储转发**来实现**分组交换**。要弄清分组交换的原理，首先要学习电路交换的相关概念。



1.3.1 电路交换

在早期专为电话通信服务的电信网络中，需要使用很多相互连接起来的电话交换机来完成全网的交换任务。电话交换机接通电话线的方式就是**电路交换**（Circuit Switching）。从通信资源分配的角度看，**交换**（Switching）实际上就是以某种方式动态地分配传输线路的资源。使用电路交换进行通信的三个步骤如下：

（1）**建立连接**：主叫方必须首先进行拨号以请求建立连接。当被叫方听到电话交换机送来的振铃音并摘机后，从主叫方到被叫方就建立了一条**专用的物理通路**，简称为连接。这条连接为通话双方提供通信资源。

（2）**通话**：主叫方和被叫方现在可以基于已建立的连接进行通话了。在整个通话期间，通话双方始终占用着连接，通信资源不会被其他用户占用。

（3）**释放连接**：通话完毕挂机后，从主叫方到被叫方的这条专用的物理通路被交换机释放，**将双方所占用的通信资源归还给电信网**。

如果主叫方在拨号请求建立连接时听到忙音，这可能是被叫方此时正忙或电信网的资源已不足以支持这次请求，则主叫方必须挂机等待一段时间后再重新拨号。

图1-13给出了电路交换的简化示意图。用户线是电话用户专用的，电话交换机之间的中继线是许多用户共享的。电话A与E之间的物理通路共经过了3个电话交换机，而电话B和C是同一个电话交换机覆盖范围内的用户，因此B和C之间建立的连接就不需要再经过其他的电话交换机。在A和E的通话过程中，它们始终占用这条已建立的物理通路，就好像A和E之间直接用一对电话线连接起来一样。A和E的通话结束并挂机后，它们之间的连接就断开了，之前所占用的电话交换机之间的电路又可以由其他用户使用。

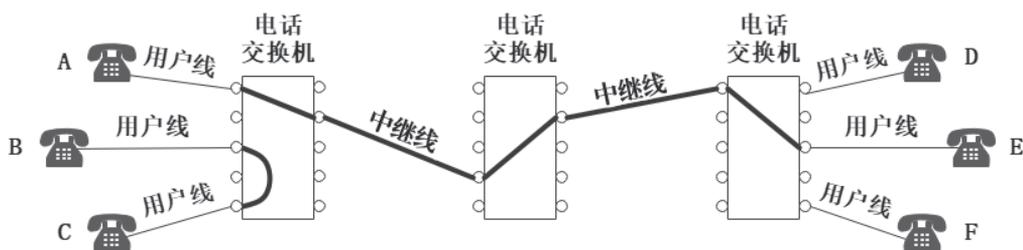


图1-13 电路交换的简化示意图

请读者思考一下：计算机之间的数据传送适合采用电路交换方式吗？

这需从计算机之间数据传送的特点来考虑。想想看，通常我们的计算机都运行着即时通信工具（例如QQ），尽管我们并不是一直连续通过该工具发送消息，但为了随时发送和接收消息，我们也一直会让其处于上线状态。对于这种情况，如果采用电路交换方式，则大部分宝贵的通信线路资源并未被利用而是被白白浪费了。也就是说，计算机之间的数据传送是**突发式的**，当使用**电路交换**来传送计算机数据时，其线路的**传输效率一般都会很低**，线路上真正用来传送数据的时间往往不到10%甚至不到1%。

1.3.2 分组交换

早在因特网的鼻祖ARPANET的研制初期，就采用了基于**存储转发技术**的**分组交换**。源主机将待发送的整块数据构造成若干个分组并发送出去，分组传送途中的各交换节点（也就是路由器）对分组进行存储转发，目的主机收到这些分组后将它们组合还原成原始数据块。

待发送的整块数据通常被称为**报文**（Message）。较长的报文一般不适宜直接传输。如果报文太长，则对交换节点的缓存容量有很大的需求，在错误处理方面也会比较低效。因此需要将较长的报文划分成若干个较小的等长数据段，在每个数据段前面添加一些由必要的控制信息（例如源地址和目的地址等）组成的**首部**（Header），这样就构造出了一个个**分组**（Packet）。分组是在分组交换网上传送的数据单元。构造分组的示意图如图1-14所示。

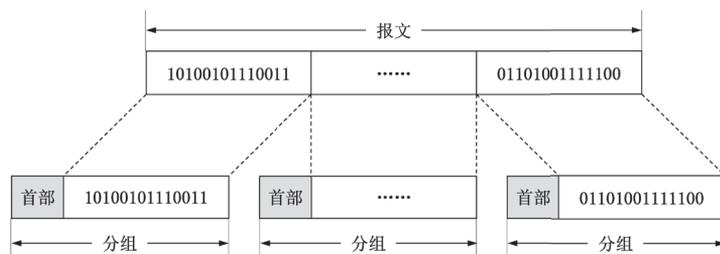


图1-14 构造分组

源主机将分组发送到分组交换网中，分组交换网中的分组交换机收到一个分组后，先将其缓存下来，然后从其首部中提取出目的地址，按照目的地址查找自己的转发表，找到相应的转发接口后将分组转发出去，把分组交给下一个分组交换机。经过多个分组交换机的存储转发后，分组最终被转发到目的主机。我们来举例说明上述过程。

在图1-15所示的简化的分组交换网中，为了简单起见，图中并没有画出互联网中通过

路由器互连的各个物理网络，而是把它们分别等效为路由器之间的一段链路，整个互联网可以看作一个分组交换网，而路由器R1~R5就是分组交换网中的交换节点，主机H1~H5通过分组交换网进行通信。

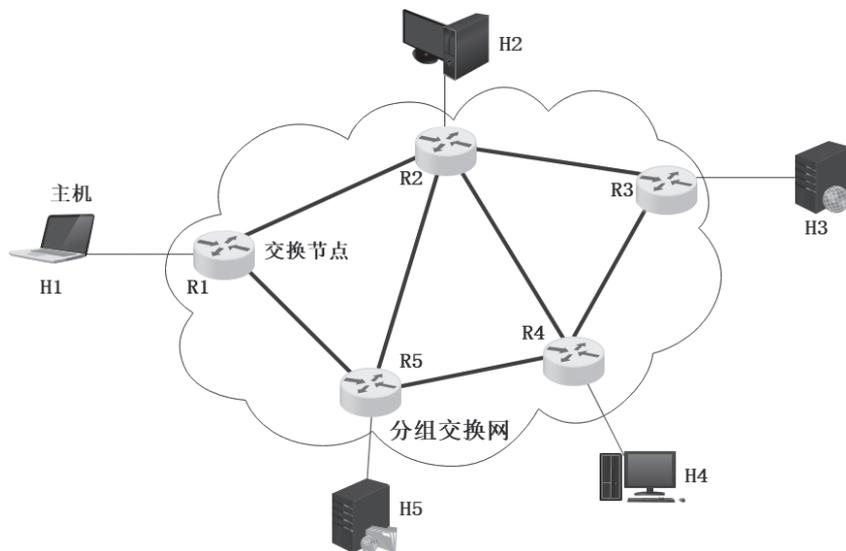


图1-15 简化的分组交换网

现在假设图1-15中的主机H1给主机H3发送数据。如图1-16所示，H1将分组逐个发送给与其直接相连的路由器R1。此时H1到R1的链路被占用，而分组交换网中的其他链路并未被当前通信的双方占用。

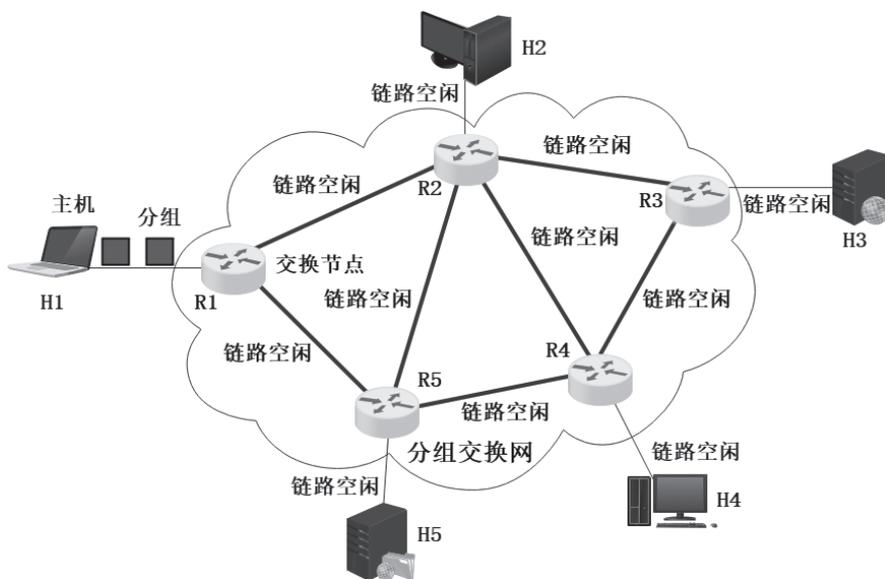


图1-16 主机H1给其直连路由器R1发送分组

路由器R1对收到的分组进行存储转发，如图1-17所示。假设R1根据分组首部的目的地址查找自己的转发表，查找结果是“下一跳为路由器R2”，则R1转发分组给R2。当分组正

在R1与R2之间的链路上传送时，仅占用R1与R2这段链路，而不会占用分组交换网中的其他资源。

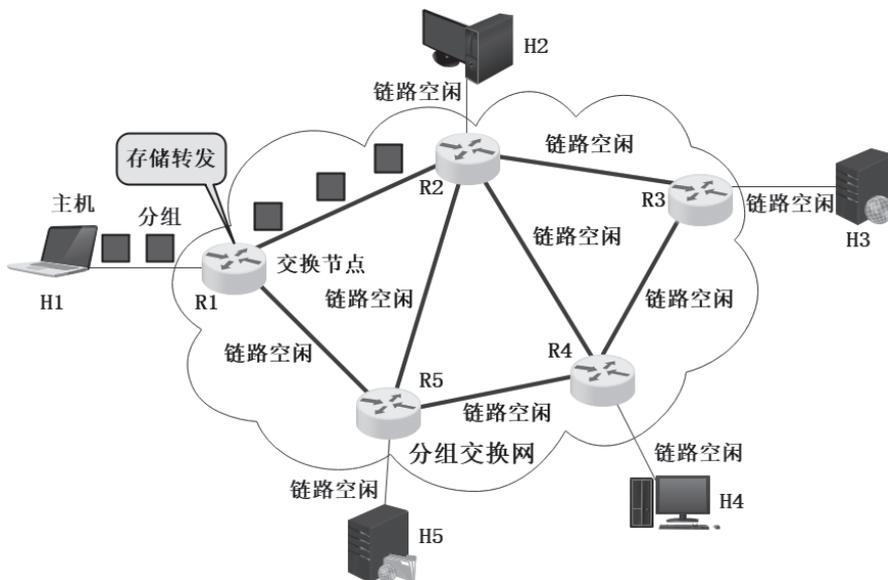


图1-17 路由器R1存储转发分组

假设路由器R2收到分组后按上述方式将分组转发给路由器R3，如图1-18所示。R3收到分组后将分组转发给主机H3。

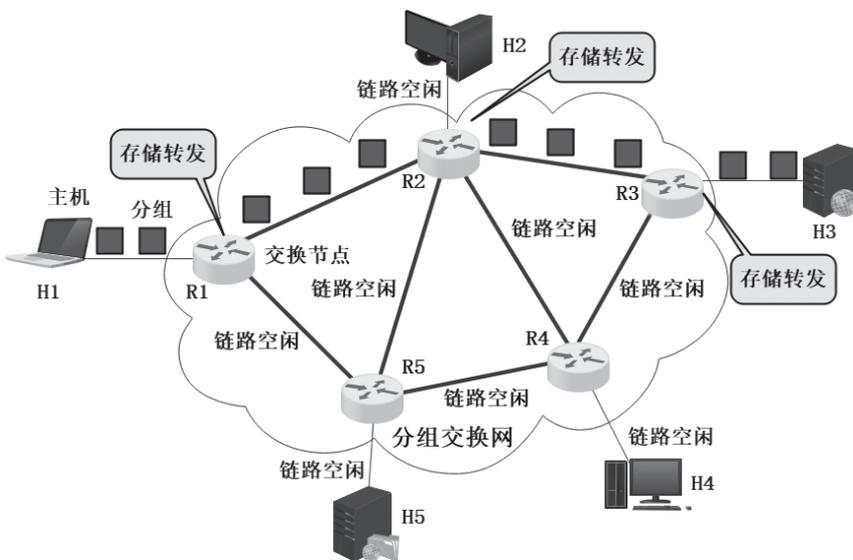


图1-18 分组经过多次存储转发后到达主机H3

假设在主机H1给H3连续发送多个分组的过程中，路由器R1与R2之间的通信量太大，那么R1可以把分组沿另一条路径转发给路由器R5，如图1-19所示。R5转发分组给R4，R4转发分组给R3，R3把分组转发给主机H3。

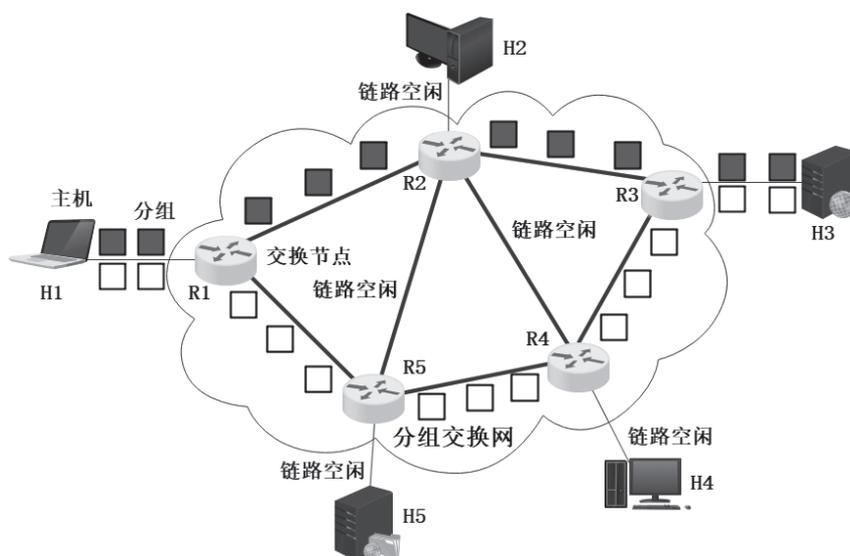


图1-19 分组可按不同路径到达主机H3

需要说明的是，在图1-16~图1-19中只展示了主机H1和H3这一对主机如何基于分组交换网进行通信。但是，在实际的因特网中，往往有大量的主机在同时通信。另外，在一台主机中，也可能有多个和网络通信相关的应用进程，它们同时与其他主机中的不同应用进程进行通信。

从上述例子可以看出，分组交换与电路交换有着很大的不同。分组交换没有建立连接和释放连接带来的开销，分组在哪段链路上才占用这段链路的通信资源，因而数据的传输效率更高，这对于突发式的计算机数据的传送是非常适宜的。**相比于采用电路交换传送突发式的计算机数据，分组交换的通信线路利用率大大提高。**

为了提高分组交换网的可靠性，常采用网状拓扑结构。当少数交换节点或链路出现故障时，又或是网络发生拥塞时，交换节点都可以相应地改变转发路由，而不会引起通信中断或全网瘫痪。另外，网络中的主干线路也常由一些高速链路组成。

分组交换的优点如下：

- 没有建立连接和释放连接的过程，分组传输过程中逐段占用通信链路，**有较高的通信线路利用率。**
- 交换节点可以为每一个分组独立选择转发路由，使得网络**有很好的生存性。**

分组交换也带来了一些问题：

- 分组首部带来了额外的传输**开销。**
- 路由器存储转发分组会造成一定的**时延。**
- 无法确保通信时端到端的通信资源全部可用，在通信量较大时可能造成**网络拥塞。**
- 分组可能会出现**失序**（未按序到达）和**丢失**等问题。

1.3.3 报文交换

报文交换是分组交换的前身。在报文交换中，**报文被整个地发送**，而不是拆分成若干

个分组进行发送。交换节点将报文整体接收完成后才能查找转发表，将整个报文转发到下一个节点。因此，**报文交换比分组交换带来的转发时延要长很多，需要交换节点具有的缓存空间也大很多。**

图1-20展示了电路交换、报文交换以及分组交换的区别。

- 在使用电路交换时，必须首先建立连接，也就是从主叫方到被叫方建立一条专用的物理通路。然后主叫方和被叫方就可以基于已建立的连接进行数据传送了。在整个数据传送期间，通信双方始终占用着连接，通信资源不会被其他用户占用。数据传送结束后还需要释放连接，双方挂机后，从主叫方到被叫方的这条专用的物理通路被交换机释放，将双方所占用的通信资源归还给电信网。
- 在使用报文交换时，无须首先建立连接，通信结束后也无须释放连接。数据传送单元为整个报文，传送路径中的交换节点只有在完整接收整个报文后，才能对其进行查表转发，将整个报文发送到下一个节点。
- 在使用分组交换时，也无须建立连接和释放连接。数据传送单元是由整个报文划分并构造出的若干个分组，传送路径中的交换节点每完整接收一个分组后，就对其查表转发，将其发送到下一个节点。

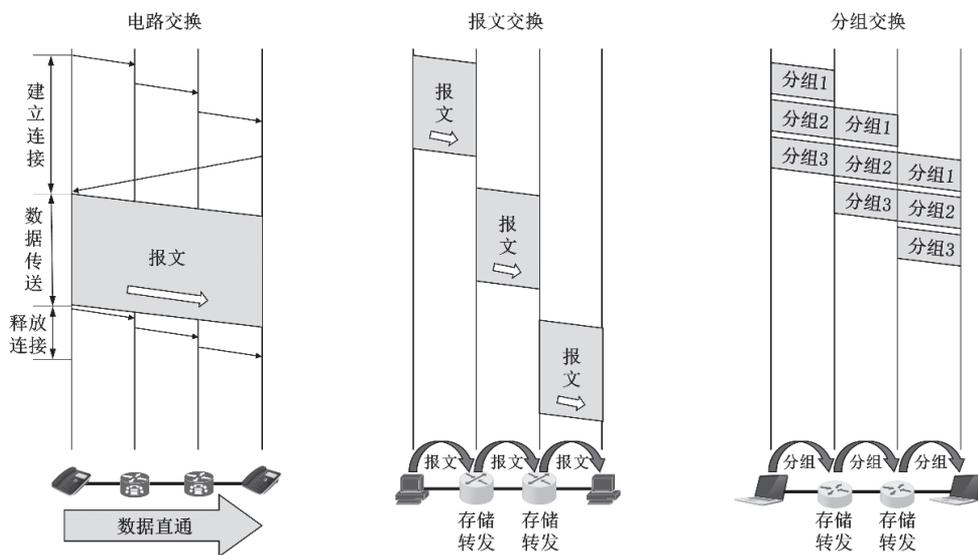


图1-20 电路交换、报文交换以及分组交换的对比

从图1-20可以看出，若要连续传送大量的数据，并且数据传送时间远长于建立连接的时间，则使用电路交换可以有较高的传输效率。然而计算机的数据传送往往是突发式的，采用电路交换时通信线路的利用率会很低。报文交换和分组交换都不需要建立连接（即预先分配通信资源），在传送计算机的突发数据时可以提高通信线路的利用率。将报文构造成为若干个更小的分组进行分组交换，比将整个报文进行报文交换的时延要小，并且还可以避免太长的报文长时间占用链路，有利于差错控制，同时具有更好的灵活性。

1.4 计算机网络的定义和分类

本节将给出计算机网络在信息时代较为合理的一个定义，并从不同角度对计算机网络进行分类。



1.4.1 计算机网络的定义

计算机网络并没有一个精确和统一的定义。在计算机网络发展的不同阶段，人们对计算机网络给出了不同的定义，这些定义反映了当时计算机网络技术发展的水平。

计算机网络早期的一个**最简单定义**是，一些**互连的、自治的计算机的集合**。“互连”是指计算机之间可以进行数据通信，而“自治”是指独立的计算机，它有自己的软硬件，可以独立运行。然而，在当今这个计算机网络技术飞速发展的信息时代，上述有关计算机网络的最简单定义已经不能很好地反映出计算机网络技术的发展水平。

有关计算机网络的一个**较好的定义**是，计算机网络主要是由一些**通用的、可编程的硬件互连而成的**，而这些硬件并非专门用来实现某一特定目的（例如，传送数据或视频信号）。这些可编程的硬件能够用来**传送多种不同类型的数据**，并能支持广泛的和日益增长的应用。这个较好的定义包含了以下含义：

- 计算机网络所连接的硬件，并不限于一般的计算机，还包括智能手机、具有网络功能的传感器以及智能家电等智能硬件。定义中的“可编程的硬件”表明这种硬件一定包含中央处理单元CPU。
- 计算机网络并非只用来传送数据，而是能够基于数据传送进而实现各种各样的应用，包括今后可能出现的各种应用。

1.4.2 计算机网络的分类

计算机网络有多种类别，下面从不同的角度对计算机网络进行分类。

1. 按网络的覆盖范围分类

(1) **广域网**（Wide Area Network, WAN）：覆盖范围通常为几十千米到几千千米，可以覆盖一个国家、地区甚至横跨几个洲。广域网是因特网的核心部分，它为因特网核心路由器提供远距离高速连接，互连分布在不同国家和地区的城域网和局域网。

(2) **城域网**（Metropolitan Area Network, MAN）：覆盖范围一般为**5~50km**，可以跨越几个街区甚至整个城市。城域网通常作为城市骨干网，互连大量机构、企业以及校园局域网。

(3) **局域网**（Local Area Network, LAN）：覆盖范围一般为**1km**，例如一个学生宿舍、一栋楼或一个校园。局域网通常由微型计算机或工作站通过速率为10Mb/s以上的高速链路相连。在过去，一个企业或学校往往只拥有一个局域网，而现在局域网已被广泛地应用，一个企业或学校可能就会有多个互连的局域网，这样的网络常称为**校园网**或**企业网**。

(4) **个域网**（Personal Area Network, PAN）：个域网是个人区域网的简称，其覆盖

范围一般为**10m**。个域网主要用于个人工作的地方，它把属于个人使用的笔记本电脑、键盘、鼠标、耳机以及打印机等电子设备用Wi-Fi或蓝牙等无线技术连接起来，因此也常称为**无线个域网**（Wireless PAN，WPAN）。

2. 按网络的使用者分类

(1) **公用网**（Public Network）：通常是由电信公司出资建造的大型网络。公众只要按照电信公司的规定交纳费用就可以使用这种网络。

(2) **专用网**（Private Network）：通常是由某个部门为满足本单位特殊业务的需要而建造的网络，例如银行、电力、铁路、军队等部门的专用网。这种网络不向本单位以外的人提供服务。

3. 按其他角度分类

除上述两种分类角度外，计算机网络还有很多分类角度。例如按传输介质分类（有线或无线）、按网络拓扑分类（总线型、星型、环型、网状型）、按交换方式分类（电路交换、报文交换、分组交换）以及按传输技术分类（点对点或广播）等。

1.5 计算机网络的性能指标

计算机网络的性能指标被用来从不同方面度量计算机网络的性能。常用的有速率、带宽、吞吐量、时延、时延带宽积、往返时间、利用率以及丢包率这8个性能指标。



1.5.1 速率

在介绍速率之前，首先来看看数据量的单位。

比特（bit，记为小写b）是计算机中数据量的基本单位，一个比特就是二进制数字中的一个1或0。数据量的常用单位有字节（byte，记为大写B）、千字节（KB）、兆字节（MB）、吉字节（GB）以及太字节（TB），如表1-1所示。

表1-1 计算机中数据量的单位

| 数据量的单位 | 换算关系 |
|---------|----------------------------|
| 比特（b） | 基本单位 |
| 字节（B） | 1B = 8bit |
| 千字节（KB） | 1KB = 2^{10} B |
| 兆字节（MB） | 1MB = 1K · KB = 2^{20} B |
| 吉字节（GB） | 1GB = 1K · MB = 2^{30} B |
| 太字节（TB） | 1TB = 1K · GB = 2^{40} B |

计算机网络中的**速率**是指**数据的传送速率**（即每秒传送多少个比特），也称为**数据率**（Data Rate）或**比特率**（Bit Rate）。速率的基本单位是比特/秒（bit/s，可简记为b/s，有时也记为bps，即bit per second）。速率的常用单位有千比特/秒（kb/s或kbps）、兆比特/秒（Mb/s

或Mbps)、吉比特/秒 (Gb/s或Gbps) 以及太比特/秒 (Tb/s或Tbps), 如表1-2所示。

表1-2 计算机网络中速率的单位

| 速率的单位 | 换算关系 |
|--------------|-----------------------------------|
| 比特/秒 (b/s) | 基本单位 |
| 千比特/秒 (kb/s) | 1kb/s = 10^3 b/s |
| 兆比特/秒 (Mb/s) | 1Mb/s = 1k · kb/s = 10^6 b/s |
| 吉比特/秒 (Gb/s) | 1Gb/s = 1k · Mb/s = 10^9 b/s |
| 太比特/秒 (Tb/s) | 1Tb/s = 1k · Gb/s = 10^{12} b/s |

请读者注意以下两点:

- 在表1-1中, 数据量单位中的K、M、G、T的数值分别为 2^{10} 、 2^{20} 、 2^{30} 、 2^{40} ; 在表1-2中, 速率单位中的k、M、G、T的数值分别为 10^3 、 10^6 、 10^9 、 10^{12} 。然而在实际应用中, 很多人并没有严格区分上述两种类型的单位。例如, 某块固态硬盘的厂家标称容量为250GB, 而操作系统给出的容量却为232GB, 如图1-21所示。产生容量差别的原因在于, 厂家在标称容量时, GB中的G并没有严格采用数据量单位中的数值 2^{30} , 而是采用了数值 10^9 ; 但操作系统在计算容量时, GB中的G严格采用了数据量单位中的数值 2^{30} 。
- 在日常生活中, 人们习惯于用更简洁但不严格的说法来描述计算机网络的速率, 例如网速为100M, 而省略了单位中的b/s。



图1-21 存储器标称容量与操作系统给出的不一致

1.5.2 带宽

带宽 (Bandwidth) 有以下两种不同的含义:

- **带宽在模拟信号系统中的意义:** 是指某个信号所包含的各种不同频率成分所占据的**频率范围**。单位是**赫兹 (Hz)**, 简称“赫”。常用单位有**千赫 (kHz)**、**兆赫 (MHz)** 以及**吉赫 (GHz)** 等。例如, 在传统的模拟通信线路上传送的电话信号的标准带宽是3.1kHz, 语音的主要成分的频率范围为300Hz~3.4kHz。表示通信线路允许通过的信号频带范围就称为**线路的带宽**。
- **带宽在计算机网络中的意义:** 用来表示网络的**通信线路所能传送数据的能力**, 即在

单位时间内从网络中的某一点到另一点所能通过的**最高数据率**。因此，在计算机网络中，带宽的单位与之前介绍过的速率的单位是相同的。基本单位是**比特/秒**（b/s或bps），常用单位有**千比特/秒**（kb/s或kbps）、**兆比特/秒**（Mb/s或Mbps）、**吉比特/秒**（Gb/s或Gbps）以及**太比特/秒**（Tb/s或Tbps）。

根据香农公式可知，带宽的上述两种表述有着密切的关系：**线路的“频率带宽”越宽，其所传输数据的“最高数据率”也越高。**

请读者注意，在实际应用中，主机的接口速率、线路带宽、交换机或路由器的接口速率遵循“**木桶效应**”，也就是数据传送速率从主机接口速率、线路带宽以及交换机或路由器的接口速率这三者中取小者，如图1-22和表1-3所示。



数据传送速率 = $\min(\text{主机的接口速率}, \text{线路带宽}, \text{交换机或路由器的接口速率})$

图1-22 速率匹配遵循“木桶效应”

表1-3 速率匹配遵循“木桶效应”举例

| 主机的接口速率 | 线路带宽 | 交换机或路由器的接口速率 | 数据传送速率 |
|---------|---------|--------------|---------|
| 1Gb/s | 1Gb/s | 1Gb/s | 1Gb/s |
| 100Mb/s | 1Gb/s | 1Gb/s | 100Mb/s |
| 1Gb/s | 100Mb/s | 1Gb/s | 100Mb/s |
| 1Gb/s | 1Gb/s | 100Mb/s | 100Mb/s |

从上述例子可以看出，在构建网络时，应该认真考虑各网络设备以及传输介质的速率匹配问题，以便达到网络本应具有的最佳传输性能。

1.5.3 吞吐量

吞吐量（throughput）是指在单位时间内通过某个网络或接口的实际数据量。吞吐量常被用于对实际网络的测量，以便获知到底有多少数据量通过了网络。

我们来举例说明吞吐量的概念，如图1-23所示。假设某用户接入因特网的带宽为100Mb/s，该用户同时使用观看网络视频、浏览网页以及给文件服务器上传文件这三个网络应用。播放网络视频的下载速率为20Mb/s，访问网页的下载速率为600kb/s，向文件服务器上传文件的上传速率为1Mb/s，则网络吞吐量就是下载速率和上传速率的总和，即20Mb/s + 600kb/s + 1Mb/s = 21.6Mb/s。

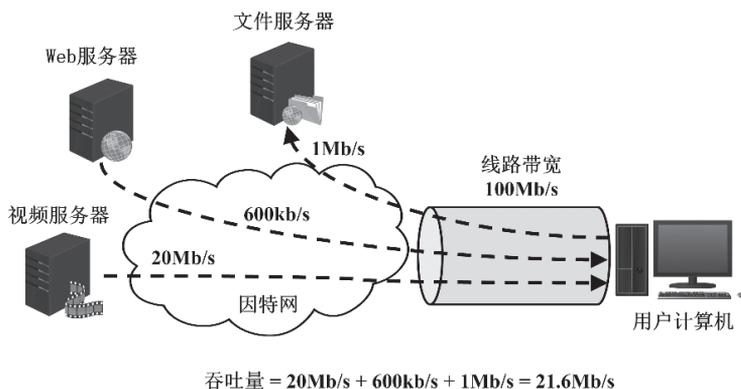


图1-23 吞吐量举例

当用户计算机中与网络通信相关的应用进程增多时，吞吐量也会随之增大，但**吞吐量**会受网络带宽的限制。

1.5.4 时延

时延 (delay或latency) 是指数据 (由一个或多个分组、甚至是一个比特构成) 从网络的一端传送到另一端所耗费的时间，也称为**延迟**或**迟延**。

网络中的时延由**发送时延**、**传播时延**、**排队时延**以及**处理时延**这四部分组成。我们来举例说明，如图1-24所示。主机A和主机B通过一台路由器进行互连，共有两段链路。主机A给主机B发送一个分组，则从主机A发送该分组开始，到主机B接收到完整的该分组为止，需要经过两个发送时延、两个传播时延、一个排队时延以及一个处理时延。

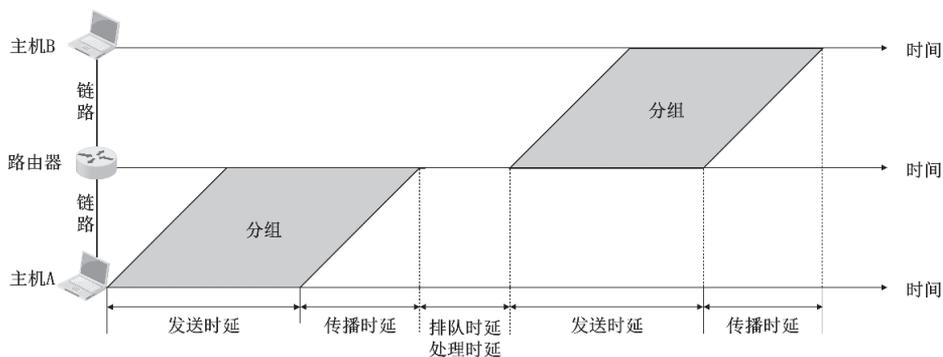


图1-24 网络时延的组成 (举例1)

请读者注意，各种时延之间并没有相互关系，它们的大小有其各自的影响因素。下面分别介绍这几种时延。

1. 发送时延

发送时延是主机或路由器发送分组所耗费的时间，也就是从发送分组的第一个比特开始，到该分组的最后一个比特发送完毕为止所耗费的时间。发送时延的计算公式如式(1-1)所示。

$$\text{发送时延} = \frac{\text{分组长度 (b)}}{\text{发送速率 (b/s)}} \quad (1-1)$$

在图1-24所示的例子中，有两个发送时延：一个是主机A将分组发送给路由器所耗费的时间，另一个是路由器将该分组转发出去所耗费的时间。

2. 传播时延

传播时延是电磁波在链路（传输介质）上传播一定的距离所耗费的时间。传播时延的计算公式如式（1-2）所示。

$$\text{传播时延} = \frac{\text{链路长度 (m)}}{\text{电磁波在链路上的传播速率 (m/s)}} \quad (1-2)$$

在图1-24所示的例子中，有两个传播时延。一个是分组的最后一个比特的信号从主机A传播到路由器所耗费的时间，另一个是该分组的最后一个比特的信号从路由器传播到主机B所耗费的时间。

电磁波在链路上的传播速率主要有以下三种：

- 电磁波在自由空间中的传播速率约为 3×10^8 m/s。
- 电磁波在铜线电缆中的传播速率约为 2.3×10^8 m/s。
- 电磁波在光纤中的传播速率约为 2×10^8 m/s。

建议读者最好能记住电磁波在链路上传播的上述三种传播速率。

3. 排队时延

当分组进入路由器后，会在路由器的输入队列中排队缓存并等待处理。在路由器确定了分组的转发接口后，分组会在输出队列中排队缓存并等待转发。**分组在路由器的输入队列和输出队列中排队缓存所耗费的时间就是排队时延。**

在分组从源主机传送到目的主机的过程中，分组往往要经过多个路由器的转发。分组在每个路由器上产生的排队时延的长短，往往取决于网络当时的通信量和各路由器的自身性能。由于网络的通信量随时间变化会很大，各路由器的性能也可能并不完全相同，因此**排队时延一般无法用一个简单的公式进行计算**。另外，当网络通信量很大时，可能会造成路由器的队列溢出，使分组丢失，这相当于排队时延无穷大。

4. 处理时延

路由器从自己的输入队列中取出排队缓存并等待处理的分组后，会进行一系列处理工作。例如，检查分组的首部是否误码、提取分组首部中的目的地址、为分组查找相应的转发接口以及修改分组首部中的部分内容（例如生存时间）等。**路由器对分组进行这一系列处理工作所耗费的时间就是处理时延。**

与排队时延类似，**处理时延一般也无法用一个简单的公式进行计算。**

前面的图1-24给出的的是一个分组由源主机发送，经过一个路由器转发后到达目的主机所经历的各种网络时延，这是一种比较简单的情况。

在实际应用中，源主机往往会连续发送多个分组，并且这些分组要经过多个路由器的

转发后才能到达目的主机。例如图1-25所示，主机A和主机B通过两个路由器互连，共三段链路。主机A给主机B连续发送四个分组，则从主机A发送第一个分组开始，到主机B接收完第四个分组为止，在不考虑排队时延和处理时延的情况下，总时延由四个分组的发送时延、三段链路的传播时延以及两个路由器的转发时延构成。

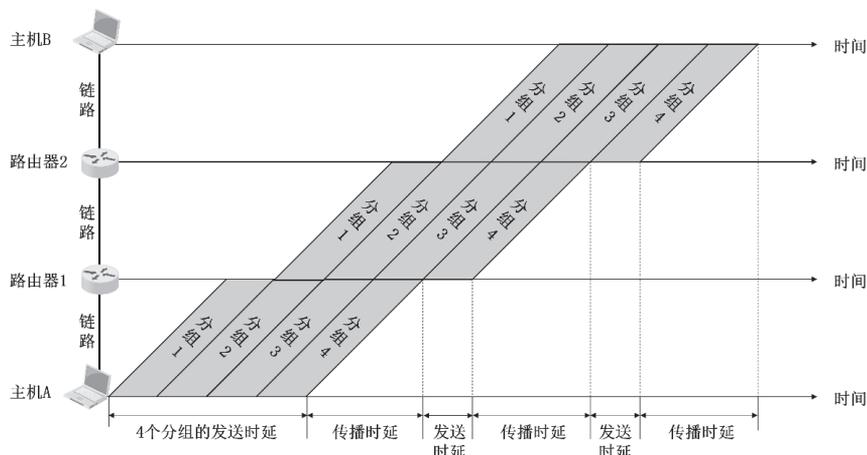


图1-25 网络时延的组成（举例2）

在图1-25中，主机A将四个分组连续发送给路由器1。路由器1每收到主机A发来的一个分组就将其转发给路由器2，与此同时还在接收主机A发来的下一个分组。路由器2每收到路由器1转发来的一个分组就将其转发给主机B，与此同时还在接收路由器1转发来的下一个分组。因此，该例子中的总时延包括以下几部分：

- 主机A发送四个分组的发送时延。
- 分组4的最后一个比特的信号从主机A传播到路由器1的传播时延。
- 路由器1转发一个分组的发送时延（注意：不是四个，否则就把时间重复计算了）。
- 分组4的最后一个比特的信号从路由器1传播到路由器2的传播时延。
- 路由器2转发一个分组的发送时延。
- 分组4的最后一个比特的信号从路由器2传播到主机B的传播时延。

希望读者可以通过本例自行推导出，在不考虑排队时延和处理时延的情况下，源主机通过 n 个路由器的转发，给目的主机发送 m 个分组的总时延计算公式。

1.5.5 时延带宽积

时延带宽积是传播时延和带宽的乘积。时延带宽积的计算公式如式（1-3）所示。



$$\text{时延带宽积} = \text{传播时延 (s)} \times \text{带宽 (b/s)} \quad (1-3)$$

我们可以将链路看作一个圆柱形管道，管道的长度是链路的传播时延（即以时间作为单位来表示链路长度），管道的横截面积是链路的带宽，如图1-26所示。因此，时延带宽积就相当于这个管道的容量，表示这样的链路可以容纳的比特数量。



图1-26 将链路看作一个圆柱形管道

下面举例说明时延带宽积的意义，如图1-27所示。

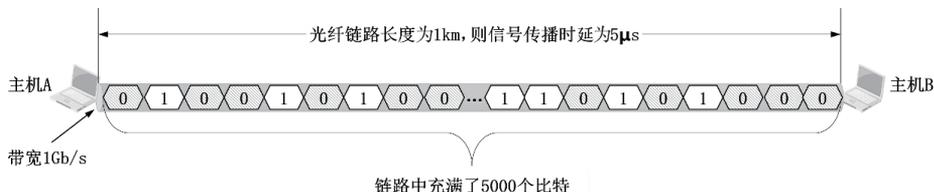


图1-27 时延带宽积的意义

主机A和主机B之间采用光纤链路，链路长度为1km，链路带宽为1Gb/s，光在光纤中的传播速率为 2×10^8 m/s，主机A给主机B连续发送数据。根据时延带宽积的计算公式（1-3）可算出

$$\text{时延带宽积} = \frac{1\text{km}}{2 \times 10^8 \text{m/s}} \times 1\text{Gb/s} = 5000\text{b}$$

本例表明，若发送端连续发送数据，则在发送的第一个比特即将到达终点时，发送端已经发送了时延带宽积个比特（对于本例是5000b），而这些比特都正在链路上向前传播。因此链路的时延带宽积也称为**以比特为单位的链路长度**，这对我们以后理解以太网的最短帧长是非常有帮助的。

1.5.6 往返时间

往返时间（Round-Trip Time, RTT）是指从发送端发送数据分组开始，到发送端收到接收端发来的相应确认分组为止，总共耗费的时间。

在图1-28中，主机A与主机B通过多个异构型的网络和多个路由器进行互连。以太网中的主机A给无线局域网中的主机B发送数据分组（图1-28的①），主机B收到数据分组后给主机A发送相应的确认分组（图1-28的②）。从主机A发送数据分组开始，到主机A收到主机B发来的相应确认分组为止，就是这一次交互的往返时间。请读者注意，**卫星链路带来的传播时延比较大**，这是因为卫星链路的通信距离一般都比较大，例如地球同步卫星与地球的距离大约为36000km，信号的往返传播时延为

$$\text{往返传播时延} = \frac{36000\text{km}}{3 \times 10^8 \text{m/s}} \times 2 = 240\text{ms}$$

往返时间是一个比较重要的性能指标。因为在我们日常的大多数网络应用中，信息都是双向交互的（而非单向传输的）。我们经常需要知道通信双方交互一次所耗费的时间。

图1-29展示了在Windows系统的命令行使用ping命令，分别测量用户主机与家庭网关、用户主机与国内哔哩哔哩网站，以及用户主机与国外coursera网站之间的连通性和往返时间的情况。

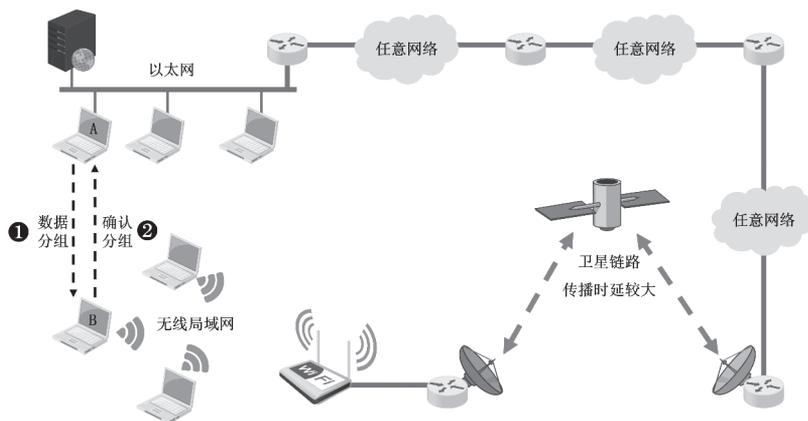


图1-28 往返时间示意图

```

命令提示符
Microsoft Windows [版本 10.0.17763.2300]
(c) 2018 Microsoft Corporation. 保留所有权利。

C:\Users\湖科大教书匠>ping 192.168.124.1  测量到家庭网关的连通性和往返时间

正在 Ping 192.168.124.1 具有 32 字节的数据:
来自 192.168.124.1 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=128

192.168.124.1 的 Ping 统计信息:      往返时间
数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
    最短 = 0ms, 最长 = 0ms, 平均 = 0ms

C:\Users\湖科大教书匠>ping bilibili.com  测量到国内哔哩哔哩网站的连通性和往返时间

正在 Ping bilibili.com [110.43.34.66] 具有 32 字节的数据:
来自 110.43.34.66 的回复: 字节=32 时间=26ms TTL=54
来自 110.43.34.66 的回复: 字节=32 时间=27ms TTL=54
来自 110.43.34.66 的回复: 字节=32 时间=26ms TTL=54
来自 110.43.34.66 的回复: 字节=32 时间=26ms TTL=54

110.43.34.66 的 Ping 统计信息:      往返时间
数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
    最短 = 26ms, 最长 = 27ms, 平均 = 26ms

C:\Users\湖科大教书匠>ping coursera.org  测量到国外coursera.org网站的连通性和往返时间

正在 Ping coursera.org [13.227.76.33] 具有 32 字节的数据:
来自 13.227.76.33 的回复: 字节=32 时间=171ms TTL=233
来自 13.227.76.33 的回复: 字节=32 时间=171ms TTL=233
来自 13.227.76.33 的回复: 字节=32 时间=170ms TTL=233
来自 13.227.76.33 的回复: 字节=32 时间=171ms TTL=233

13.227.76.33 的 Ping 统计信息:      往返时间
数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
    最短 = 170ms, 最长 = 171ms, 平均 = 170ms

C:\Users\湖科大教书匠>

```

图1-29 使用ping测量连通性和往返时间

1.5.7 利用率

利用率有**链路利用率**和**网络利用率**两种。

链路利用率是指某条链路有百分之几的时间是被利用的（即有数据通过）。完全空闲的链路的利用率为零。

网络利用率是指网络中所有链路的链路利用率的加权平均。

根据排队论可知，当某链路的利用率增大时，该链路引起的时延就会迅速增加。这并

不难理解。例如，当公路上的车流量增大时，公路上的某些地方会出现拥堵，所需行车时间就会变长。网络也是如此，当网络的通信量较少时，产生的时延并不大，但在网络通信量不断增大时，分组在交换节点（路由器或交换机）中的排队时延会随之增大，因此网络引起的时延就会增大。若令 D_0 表示网络空闲时的时延， D 表示网络当前的时延，那么在理想的假定条件下，可用下面的公式（1-4）来表示 D 、 D_0 和网络利用率 U 之间的关系。

$$D = \frac{D_0}{1-U} \quad (1-4)$$

按照公式（1-4）可以画出时延 D 随网络利用率 U 的变化关系，如图1-30所示。

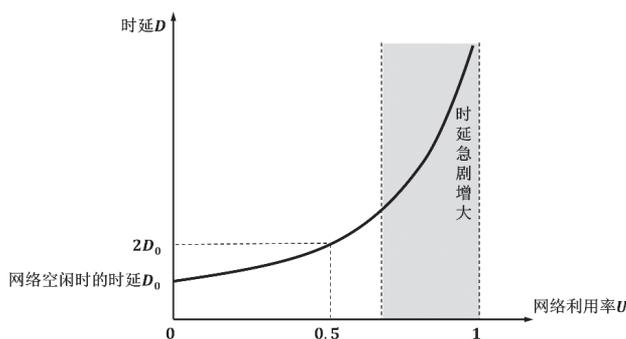


图1-30 时延 D 随网络利用率的变化关系

从图1-30可以看出，时延 D 随网络利用率 U 的增大而增大。当网络利用率达到0.5时，时延就会加倍。当网络利用率接近最大值1时，时延就趋于无穷大。因此，网络利用率并不是越大越好，过高的网络利用率会产生非常大的时延。一些大型ISP往往会控制信道利用率不超过50%。如果超过了就要进行扩容，增大线路的带宽。

1.5.8 丢包率

丢包率是指在一定的时间范围内，传输过程中丢失的分组数量与总分组数量的比例。丢包率可分为接口丢包率、节点丢包率、链路丢包率、路径丢包率以及网络丢包率等。

在过去，丢包率只是网络运维人员比较关心的一个网络性能指标，而普通用户往往并不关心这个指标，因为他们通常意识不到网络丢包。随着网络游戏的迅速发展，现在很多游戏玩家也非常关心丢包率这个网络性能指标。

分组丢失主要有以下两种情况：

- 分组在传输过程中出现误码，被传输路径中的节点交换机（例如路由器）或目的主机检测出**误码而丢弃**。
- 分组交换机根据**丢弃策略**主动丢弃分组。

下面举例说明分组丢失的两种情况，如图1-31所示。

情况1：主机A给主机B连续发送若干个分组，其中某些分组在传输过程中出现了误码。例如在路由器R1到路由器R2的链路上有分组出现了误码，R2收到后检测出分组有误码而丢弃该分组；在路由器R3到主机B的链路上有分组出现误码，主机B收到后检测出分组有误码而丢弃该分组。

情况2：假设路由器R5的输入队列已满，没有空间存储新收到的分组，则R5主动丢弃新收到的分组。请读者注意，在实际应用中，路由器会根据自身的拥塞控制算法，在输入队列还未满的时候就开始主动丢弃分组。

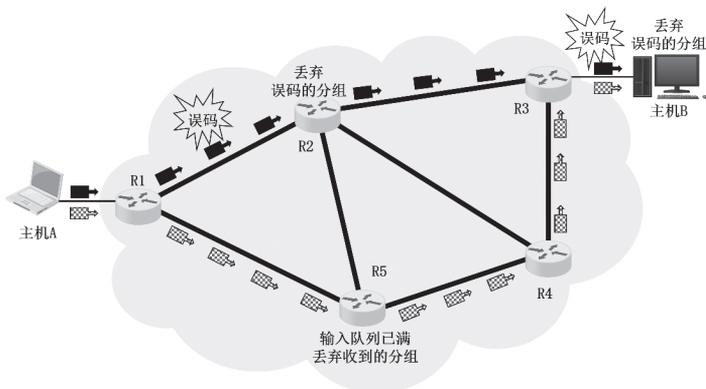


图1-31 分组丢失的两种情况

丢包率可以反映网络的拥塞情况：

- 无拥塞时路径丢包率为0。
- 轻度拥塞时路径丢包率为1%~4%。
- 严重拥塞时路径丢包率为5%~15%。

当网络的丢包率较高时，通常无法使网络应用正常工作。

1.6 计算机网络体系结构

计算机网络体系结构是学习和研究计算机网络的理论框架。计算机网络体系结构的抽象概念较多，建议读者在学习时要多思考，这些概念对后续章节的学习很有帮助。



1.6.1 常见的三种计算机网络体系结构

1. 开放系统互连参考模型

为了使不同体系结构的计算机网络都能互连起来，国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）于1977年成立了专门机构研究该问题。不久，他们就提出了一个使全世界各种计算机可以互连成网的标准框架，这就是著名的**开放系统互连参考模型**（Open Systems Interconnection Reference Model, OSI/RM），简称OSI。在1983年形成了开放系统互连参考模型的正式文件（ISO 7498国际标准）。

OSI参考模型是一个七层协议的体系结构，自下而上依次是物理层、数据链路层、网络层、运输层、会话层、表示层以及应用层，如图1-32所示。

OSI体系结构

| |
|-------|
| 应用层 |
| 表示层 |
| 会话层 |
| 运输层 |
| 网络层 |
| 数据链路层 |
| 物理层 |

法律上的国际标准

图1-32 OSI七层协议体系结构

OSI体系结构是法律上的国际标准，它试图达到一种理想境界，即全世界的计算机网络都遵循这个统一的国际标准，进而使全世界的计算机能够很方便地进行互连和交换数据。然而到了20世纪90年代初期，尽管整套的OSI国际标准都已经制订出来了，但这时因特网已抢先在全世界覆盖了相当大的范围。因特网从1983年开始使用TCP/IP协议族，并逐步演变成TCP/IP参考模型。OSI只获得了一些理论研究的成果，但在市场化方面却输给了TCP/IP标准。OSI失败的原因有以下几点：

- OSI的专家们**缺乏实际经验**，他们在完成OSI标准时**没有商业驱动力**。
- OSI的协议实现起来**过分复杂**，而且**运行效率很低**。
- OSI标准的**制定周期太长**，因而使得按OSI标准生产的设备**无法及时进入市场**。
- OSI的层次划分也不太合理，**有些功能在多个层次中重复出现**。

在过去，制定标准的组织中往往以专家、学者为主。但现在许多公司都纷纷挤进各种各样的标准化组织，使得技术标准有着浓厚的商业气息。例如我国的华为公司，近些年一直参与国际行业的标准制定，加入了包括ISO、ITU及IEEE在内的400多个标准组织、产业联盟以及开源社区。仅仅在2018年就提交了5000多篇标准提案，曾累积提交60 000多篇标准提案，是我国参与国际标准制定的重要力量。

一个新标准的出现，有时不一定反映出其技术水平是最先进的，而是往往有着一定的市场背景。从这种意义上说，**能够占领市场的就是标准**。因特网使用TCP/IP参考模型，就是最好的例证。

2. TCP/IP参考模型

因特网是全球覆盖范围最广、用户数量最多的互联网，它采用**TCP/IP参考模型**。

TCP/IP参考模型是一个四层协议的体系结构，自下而上依次是网络接口层、网际层、运输层以及应用层，如图1-33所示。

TCP/IP体系结构相当于将OSI体系结构的物理层和数据链路层合并为了网络接口层，将会话层和表示层合并到了应用层，如图1-34所示。请读者注意，由于TCP/IP在网络层使用的核心协议是**IP协议**，IP协议的中文意思是网际协议（Internet Protocol，IP），因此TCP/IP体系结构的网络层也常称为**网际层**。

大多数网络用户每天都有使用因特网的需求，这就要求用户的主机必须使用TCP/IP体系结构。在用户主机的操作系统中，通常都带有完整的TCP/IP协议族。而因特网中用于网络互连的路由器，就其所需完成的网络互连这一基本任务而言，只包含TCP/IP的网络接口层和网际层即可，因此我们一般认为路由器的网络体系结构的最高层为网际层（网络层），如图1-35所示。

TCP/IP体系结构各层包含的主要协议如图1-36所示。

(1) TCP/IP体系结构的网络接口层并没有规定什么具体的内容，这样做的目的是可以互连全世界各种不同的网络接口，例如有线的以太网接口、无线局域网的Wi-Fi接口，而不



图1-33 TCP/IP四层协议体系结构

限定仅使用一种或几种网络接口。因此，TCP/IP体系结构在本质上只有上面的三层。

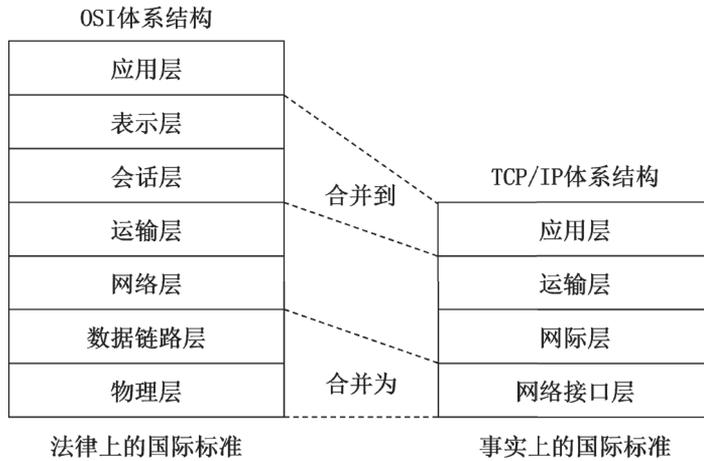


图1-34 OSI体系结构与TCP/IP体系结构的对比

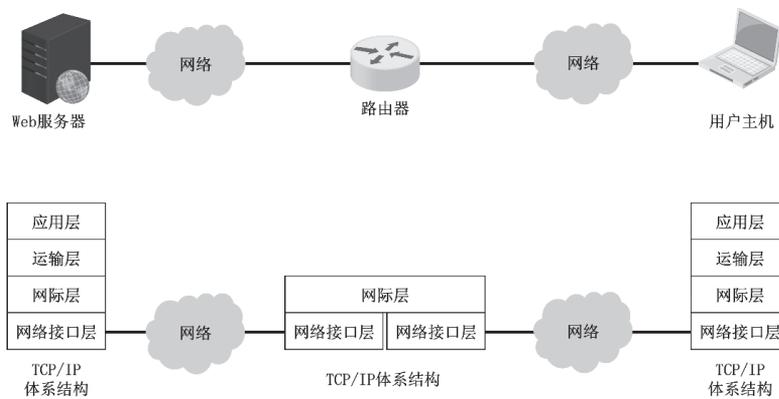


图1-35 主机和路由器中的TCP/IP体系结构

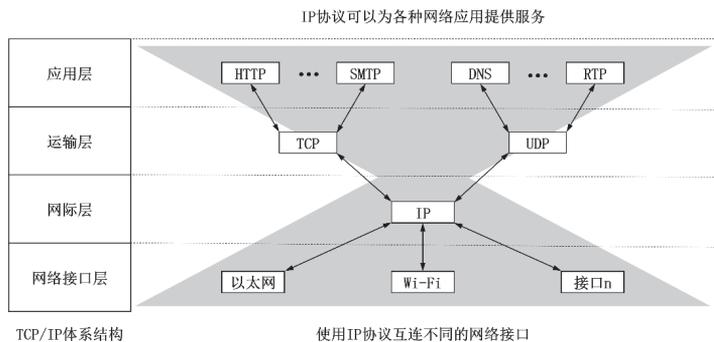


图1-36 TCP/IP体系结构各层包含的主要协议

- (2) 网际协议IP是TCP/IP体系结构网际层的核心协议。
- (3) 传输控制协议（Transmission Control Protocol, TCP）和用户数据报协议（User Datagram Protocol, UDP）是TCP/IP体系结构运输层的两个重要协议。

(4) TCP/IP体系结构的应用层包含了大量的应用层协议，例如超文本传送协议（HyperText Transfer Protocol, HTTP）、简单邮件传送协议（Simple Mail Transfer Protocol, SMTP）、域名系统（Domain Name System, DNS）以及实时运输协议（Real-time Transport Protocol, RTP）等。即便读者是计算机网络的初学者，对HTTP这个英文缩写词可能也不会陌生，因为每当我们打开浏览器，在地址栏输入网址时就会看到它。

从图1-36可以看出，IP协议可以将不同的网络接口进行互连，并向其上的TCP协议和UDP协议提供网络互连服务。TCP协议在享受IP协议提供的网络互连服务的基础上，可向应用层的某些协议提供**可靠传输**的服务。UDP协议在享受IP协议提供的网络互连服务的基础上，可向应用层的某些协议提供**不可靠传输**的服务。IP协议作为TCP/IP体系结构中的核心协议，一方面负责互连不同的网络接口，也就是IP over everything；另一方面为各种网络应用提供服务，也就是Everything over IP。

由于TCP/IP协议体系中包含大量的协议，而IP协议和TCP协议是其中非常重要的两个协议，因此用TCP和IP这两个协议来表示整个协议大家族，常称为**TCP/IP协议族**。顺便提一下，在嵌入式系统开发领域，TCP/IP协议族也常称为**TCP/IP协议栈**。这是因为TCP/IP协议体系的分层结构与数据结构中的**栈**在图形画法上是类似的。

3. 原理参考模型

TCP/IP体系结构为了将不同的网络接口进行互连，其网络接口层并没有规定什么具体内容。然而，这对于我们学习计算机网络的完整体系而言，就会缺少一部分内容。因此，在学习计算机网络原理时往往采取折中的办法，也就是综合OSI参考模型和TCP/IP参考模型的优点，采用一种原理参考模型。

原理参考模型是一个五层协议的体系结构，自下而上依次是物理层、数据链路层、网络层、运输层以及应用层，如图1-37所示。

五层协议的原理体系结构将TCP/IP体系结构的**网络接口层**又重新划分为**物理层**和**数据链路层**，如图1-38所示。这样更有利于我们对计算机网络原理的学习。



图1-37 五层协议的原理体系结构

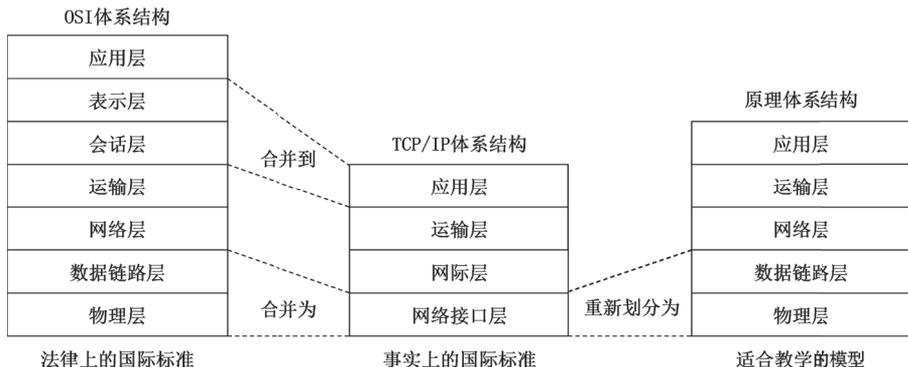


图1-38 三种常见的计算机网络体系结构

1.6.2 计算机网络体系结构分层的必要性



分层是计算机网络体系结构最重要的思想。本节将以五层原理体系结构为例，介绍计算机网络体系结构分层的必要性。

计算机网络是一个非常复杂的系统。早在ARPANET的设计初期就提出了分层的设计理念。“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容易研究和处理。

下面按照由简单到复杂的顺序，来看看实现计算机网络要面临哪些主要问题，以及如何将这些问题划分到五层原理体系结构的相应层次，以便层层处理。

1. 物理层 (physical layer)

首先来看最简单的情况。两台计算机通过一条链路连接起来，如图1-39所示。

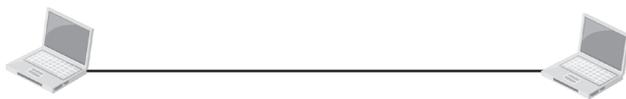


图1-39 最简单的计算机网络

我们来看看在图1-39所示的最简单的计算机网络中，需要考虑的主要问题有哪些。

1) 采用什么传输媒体

可以采用多种传输媒体作为传输链路。例如同轴电缆、双绞线电缆、光纤和光缆、自由空间等，如图1-40所示。



图1-40 传输媒体

2) 采用什么物理接口

用户主机、交换机以及路由器等网络设备需要采用恰当的物理接口来连接传输媒体。例如图1-41所示的是计算机主板上常见的RJ45以太网接口。

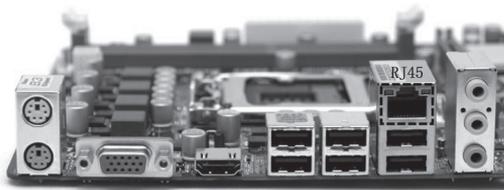


图1-41 计算机主板上常见的RJ45以太网接口

3) 采用什么信号

在确定了传输媒体和物理接口后，还要考虑使用怎样的信号来表示比特0和1，进而在传输媒体上进行传送。例如使用图1-42所示的数字基带信号，低电平表示比特0，高电平表示比特1。

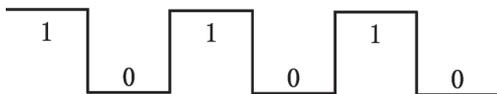


图1-42 使用数字基带信号表示比特0和1

解决了上述这些问题，两台计算机之间就可以通过信号来传输比特0和1了，如图1-43所示。

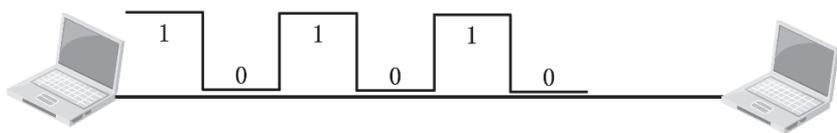


图1-43 两台计算机之间通过信号来传输比特0和1

我们可以将上述这些问题划归到物理层。

请读者注意，严格来说**传输媒体并不属于物理层范畴**，它并不包含在计算机网络体系结构之中。另外，计算机网络中传输的信号，并不是我们举例的简单的数字基带信号。我们之所以举例成数字基带信号，是为了让读者更容易理解。当读者在学习本身就不容易理解的、概念抽象的计算机网络体系结构时，不让其他技术细节再给读者造成学习障碍。

2. 数据链路层 (data link layer)

实用的计算机网络往往由多台计算机互连而成，而不是图1-43所示的两台计算机互连。例如主机A、主机B和主机C通过总线互连成了一个总线型网络，如图1-44所示。

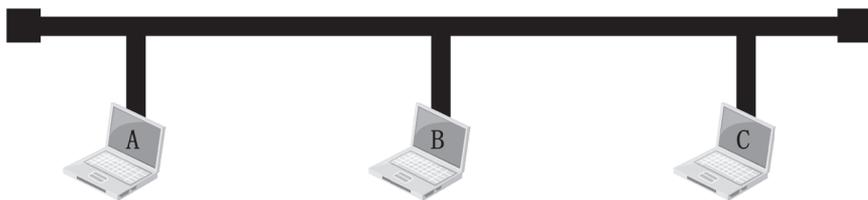


图1-44 由3台主机互连成的总线型网络

假设我们已经解决了物理层的问题，即主机间可以通过信号来传送比特0和1了。来看看在图1-44所示的总线型网络中，需要考虑的主要问题有哪些。

1) 如何标识网络中的各主机

假设主机A要给主机B发送数据，如图1-45所示。表示数据的信号会通过总线传播到总线上的每一个主机。那么主机B如何知道该数据是主机A发送给自己的，进而接受该数据，而主机C又如何知道该数据并不是发送给自己的，应该丢弃该数据呢？这就需要解决如何标识网络中各主机的问题，即主机编址问题。读者可能听说过网卡上固化的**MAC地址**，其实MAC地址就是主机在网络中的地址。

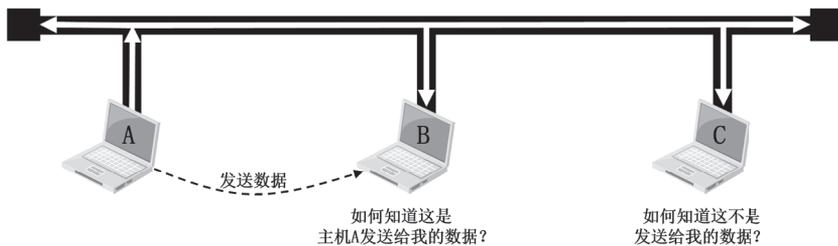


图1-45 信号沿总线传播

2) 如何区分出地址和数据

主机在发送数据时应该给数据附加上源地址和目的地址。当其他主机收到后，根据目的地址和自身地址是否匹配，来决定是否接受该数据，还可以通过源地址知道是哪个主机发来的数据，如图1-46所示。

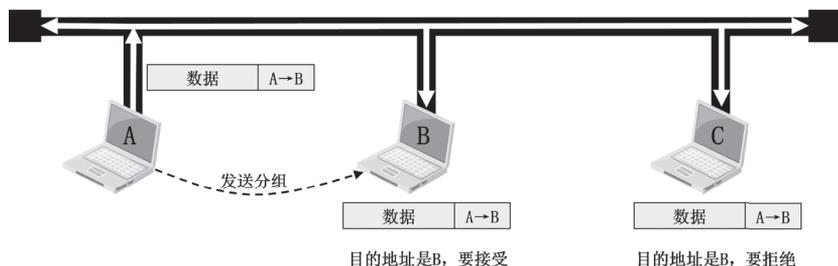


图1-46 给主机编址的作用

要将源地址和目的地址附加到数据上，这就需要收发双方约定好数据的封装格式。发送方将待发送的数据按照事先约定好的格式进行封装（即在数据前面添加包含源地址、目的地址和其他一些控制信息的首部），然后将封装好的数据包发送出去。接收方收到数据包后，按照事先约定好的格式对其进行解封。

为了简单起见，在图1-46所示的数据包首部中仅包含了源地址和目的地址，并且仅用一个字母表示地址。

3) 如何协调各主机争用总线

对于总线型的网络，还会出现多个主机争用总线时产生碰撞的问题。例如，某个时刻总线是空闲的，也就是没有主机使用总线来发送数据。片刻之后，主机A和主机C同时使用总线来发送数据，这必然会造成信号碰撞，如图1-47所示。因此，如何协调各主机争用总线，也是必须要解决的问题。

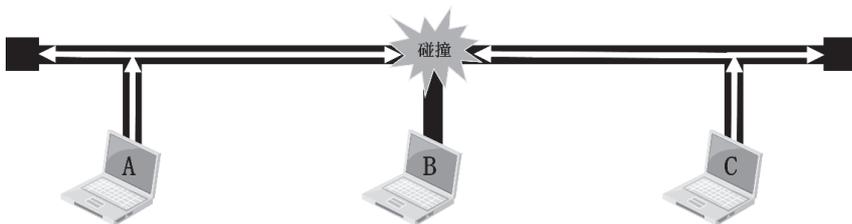


图1-47 两个主机争用总线时产生碰撞

请读者注意，上述这种总线型网络早已淘汰。现在常用的是使用以太网交换机将多台主机互连成交换式以太网，如图1-48所示。在交换式以太网中，不会出现主机争用总线而产生碰撞的问题。那么以太网交换机又是如何实现的呢？

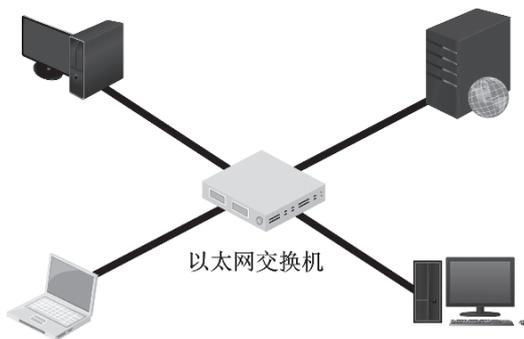


图1-48 多个主机通过以太网交换机互连

我们可以将上述这些问题划归到数据链路层。

3. 网络层 (network layer)

解决了物理层和数据链路层各自所面临的问题后，就可以实现数据包在一个网络上传输了。然而，我们的网络应用往往不仅限于在一个单独的网络上。例如，我们几乎每天都会使用的因特网，是由非常多的网络和路由器互连起来的，仅解决物理层和数据链路层的问题，还是不能正常工作。

我们可以把图1-49所示的小型互联网看作因特网中很小的一部分，我们来看看在该小型互联网中，需要考虑的主要问题有哪些。

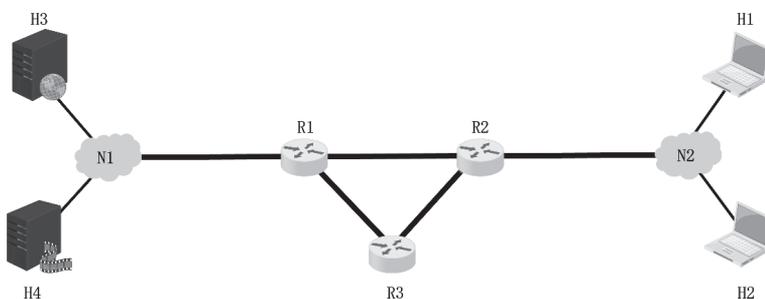


图1-49 小型互联网

1) 如何标识互联网中的各网络以及网络中的各主机

由于互联网是由多个网络通过多个路由器互连起来的，因此我们还需要对互联网中的各网络进行标识。这就引出了**网络和主机共同编址**的问题，相信读者一定听说过**IP地址**。

我们给图1-49中的各主机和部分路由器接口分配如图1-50所示的IP地址。

网络N1中的主机H3、主机H4以及路由器R1连接网络N1的接口，它们都处于同一个网络，因此它们的IP地址的网络号相同，在本例中为192.168.0，而它们的主机号分别为1、2以及254，各不相同，用于在网络N1中唯一标识它们自己。

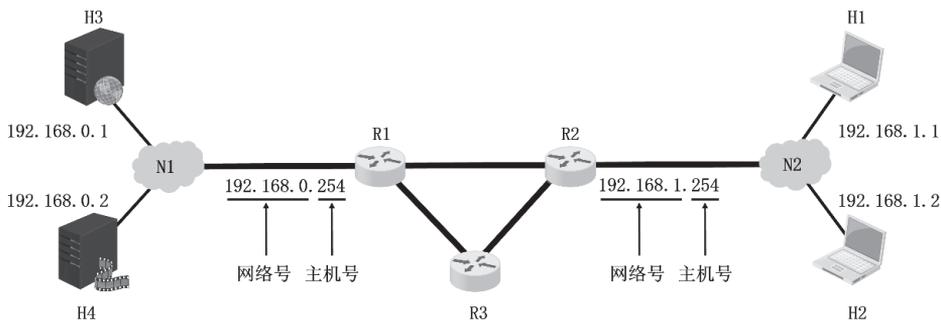


图1-50 小型互联网中各设备的IP地址

同理，我们给网络N2中的主机H1、主机H2以及路由器R2连接网络N2的接口也分配了相应的IP地址。请读者注意，给网络N2分配的网络号为192.168.1，这与给网络N1分配的网络号192.168.0是不同的，因为它们是不同的网络。我们将在第4章中详细介绍IP地址的相关内容，这里就不再深入介绍了。

2) 路由器如何转发分组和进行路由选择

在互联网中，源主机与目的主机之间的传输路径往往不止一条。**分组从源主机到目的主机可走不同的路径**，如图1-51所示。这就引出了路由器如何转发分组以及进行路由选择的问题。

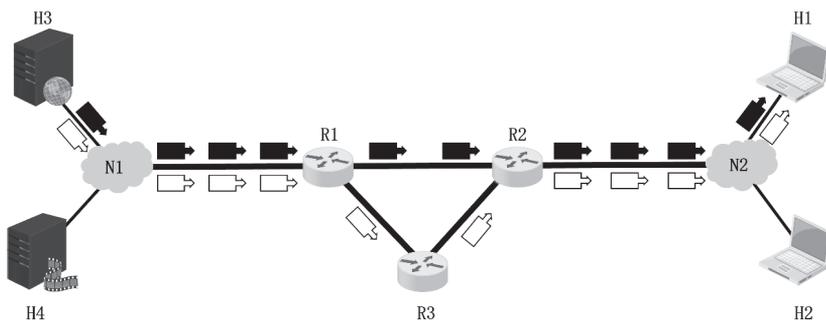


图1-51 源主机和目的主机之间有多条路径

我们可以将上述这些问题划归到网络层。

4. 运输层 (transport layer)

解决了物理层、数据链路层以及网络层各自的问题后，就可以实现分组在多个网络之间的传送了。然而，对于计算机网络应用而言，仍有一些重要问题需要考虑。

1) 如何标识主机中与网络通信相关的应用进程

在用户主机中同时运行着的、与网络通信相关的应用进程往往不止一个。当主机通过网络接收到数据包后，**应将数据包交付给哪一个应用进程**就成为了一个亟待解决的问题。

在图1-52中，主机H3中运行着与网络通信相关的Web服务器进程Nginx，主机H1中运行着与网络通信相关的浏览器进程和QQ进程。当主机H1收到主机H3中Nginx进程发来的数据包时，应将数据包交付给浏览器进程还是QQ进程呢？很显然，如果数据包中含有与进程相

关的标志信息，主机H1就可以根据标志信息将数据包交付给相应的应用进程。

这就引出了如何标识与网络通信相关的应用进程、进而解决进程之间基于网络通信的问题。

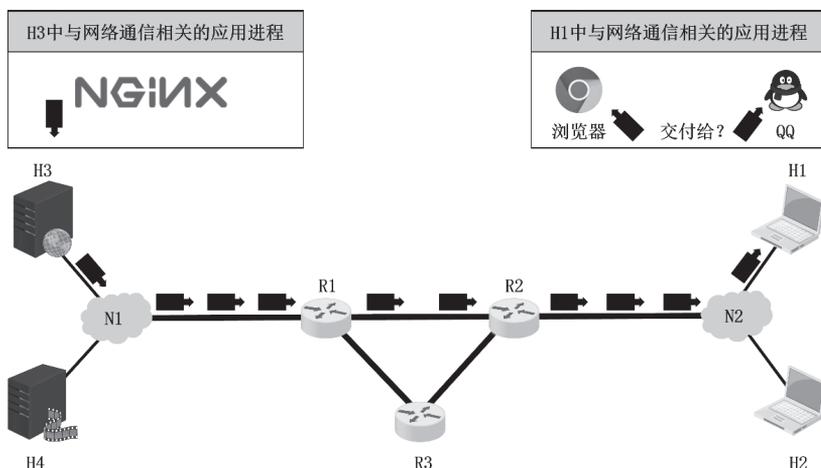


图1-52 进程之间基于网络的通信

2) 如何处理传输差错

在1.5.8节中，曾介绍过分组由于误码被路由器或用户主机丢弃，又或是由于路由器繁忙而主动丢弃正常分组，这些都属于传输差错。那么，当出现传输差错时应该如何处理，这也是需要解决的问题。

我们可以将上述这些问题划归到运输层。

5. 应用层 (application layer)

解决了物理层、数据链路层、网络层以及运输层各自的问题后，就可以实现进程之间基于网络的通信了。

在进程之间基于网络通信的基础上，可以制定**各种应用协议**，并按协议标准编写相应的应用程序，通过应用进程之间的交互来实现特定的网络应用。例如支持万维网的HTTP协议、支持电子邮件的SMTP协议以及支持文件传送的FTP协议等。另外，在制定应用协议时，还需要考虑应用进程基于网络通信时的**会话管理问题**和**数据表示问题**（采用何种编码、是否加密和压缩数据）。

我们可以将上述这些问题划归到应用层。

至此，我们将实现计算机网络所需要解决的各种主要问题，分别划归到了物理层、数据链路层、网络层、运输层以及应用层。这就构成了五层原理体系结构，如图1-53所示。

五层原理体系结构各层的主要功能分别是：

- **物理层**解决使用何种信号来表示比特0和1的问题。
- **数据链路层**解决数据包在一个网络或一段链路上传输的问题。
- **网络层**解决数据包在多个网络之间传输和路由的问题。

| 原理体系结构 | |
|--------|-------------------------|
| 应用层 | 解决通过应用进程的交互来实现特定网络应用的问题 |
| 运输层 | 解决进程之间基于网络的通信问题 |
| 网络层 | 解决数据包在多个网络之间传输和路由的问题 |
| 数据链路层 | 解决数据包在一个网络或一段链路上传输的问题 |
| 物理层 | 解决使用何种信号来表示比特0和1的问题 |

适合教学的模型

图1-53 五层原理体系结构各层的主要功能

- **运输层**解决进程之间基于网络的通信问题。
- **应用层**解决通过应用进程的交互来实现特定网络应用的问题。

请读者思考一下，如果你是一名程序员，要编程解决实现计算机网络所面临的各种软件问题。那么，你是愿意将这些问题全部放在一个模块中编程实现呢，还是愿意将它们划分到不同的模块中，逐个模块编程实现呢？相信读者一定会选择后者。

1.6.3 计算机网络体系结构分层思想举例

为了帮助读者更好地领会计算机网络体系结构的分层思想，我们将通过一个常见的网络应用实例来介绍计算机网络体系结构的分层处理方法。

如图1-54所示，主机属于网络N1，Web服务器属于网络N2，N1和N2通过路由器互连。用户在主机中使用浏览器访问Web服务器的过程如下：



图1-54 网络应用实例（访问网站）

- (1) 用户在浏览器地址栏中输入Web服务器的域名（图1-54的①）。
- (2) 主机向Web服务器发送一个请求报文（图1-54的②）。
- (3) Web服务器收到请求报文后，执行相应的操作，然后给主机发送响应报文（图1-54的③）。

(4) 主机收到响应报文后，由浏览器负责解析和渲染显示（图1-54的④）。

请读者注意，上述网络应用实例仅给出了一个简化的示意过程，因为本节的重点是计算机网络体系结构的分层处理方法，而不是浏览器和Web服务器的详细交互过程。

主机和Web服务器之间基于网络的通信，实际上是主机中的浏览器应用进程与Web服务器中的Web服务器应用进程之间基于网络的通信。我们从图1-55所示的五层原理体系结构的角度来看其具体过程。

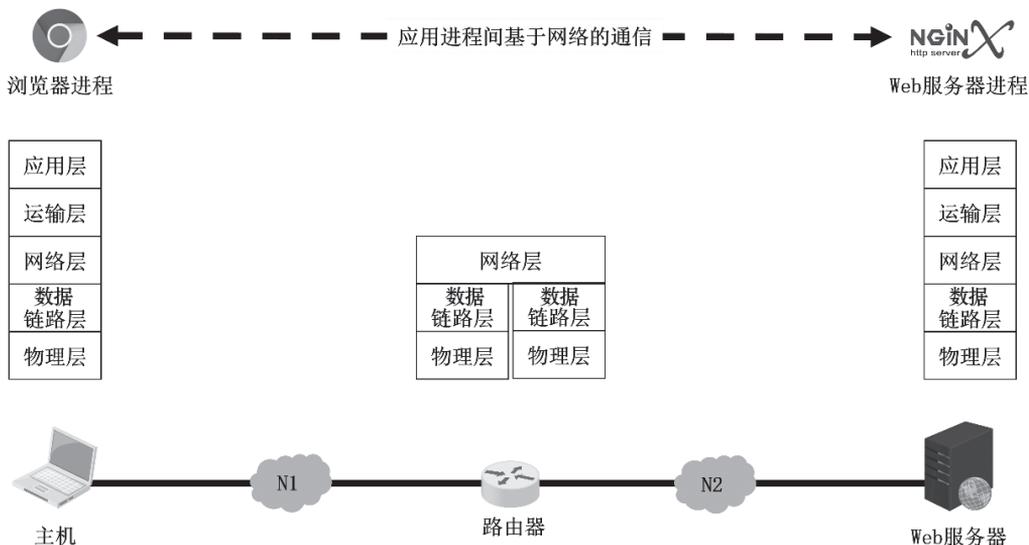


图1-55 从五层原理体系结构的角度看应用进程间基于网络的通信

1. 主机对数据包的处理过程

主机对数据包的处理过程如图1-56所示。

(1) **应用层**：根据HTTP协议的规定，构建一个HTTP请求报文，用来请求Web服务器执行相应的操作。应用层将构建好的HTTP请求报文向下交付给运输层。

(2) **运输层**：给HTTP请求报文添加一个TCP首部，将其封装成TCP报文段。TCP首部的主要作用是区分应用进程和实现可靠传输。运输层将封装好的TCP报文段向下交付给网络层。

(3) **网络层**：为TCP报文段添加一个IP首部，将其封装成IP数据报。IP首部的主要作用是IP寻址和路由。网络层将封装好的IP数据报向下交付给数据链路层。

(4) **数据链路层**：为IP数据报添加一个首部和一个尾部，将其封装成帧。帧首部和尾部的主要作用是MAC寻址和帧校验。数据链路层将封装好的帧向下交付给物理层。

(5) **物理层**：并不认识帧的结构，仅仅将其看作比特流，以便将比特流转换成相应的电信号进行发送。对于以太网，物理层还会在比特流前添加前导码，目的是使接收方的时钟同步，并做好接收准备。

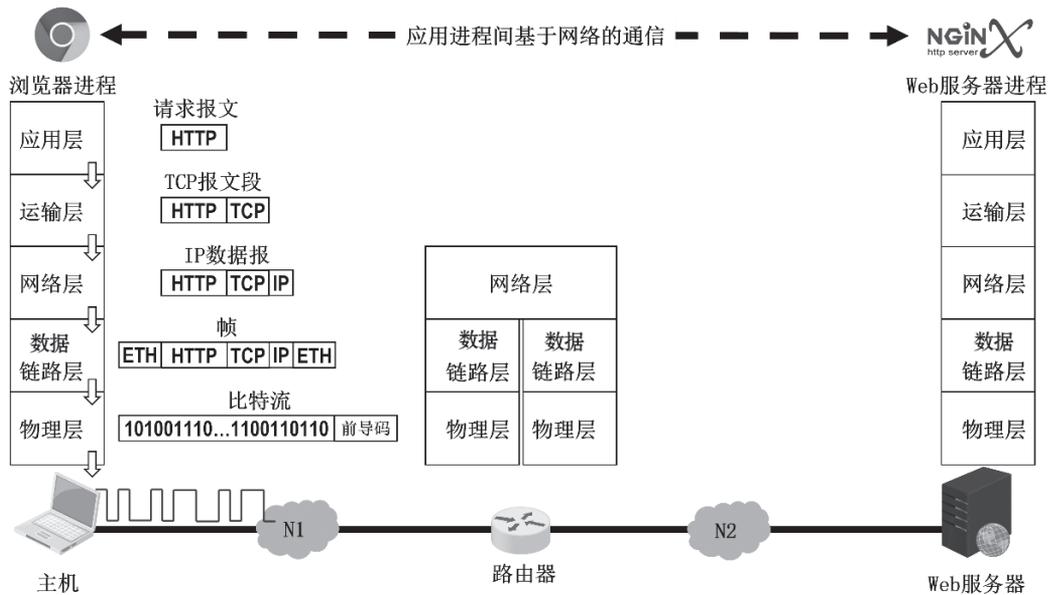


图1-56 发送方逐层封装数据包

2. 路由器对数据包的处理过程

路由器收到数据包后对其进行处理和转发的过程如图1-57所示。

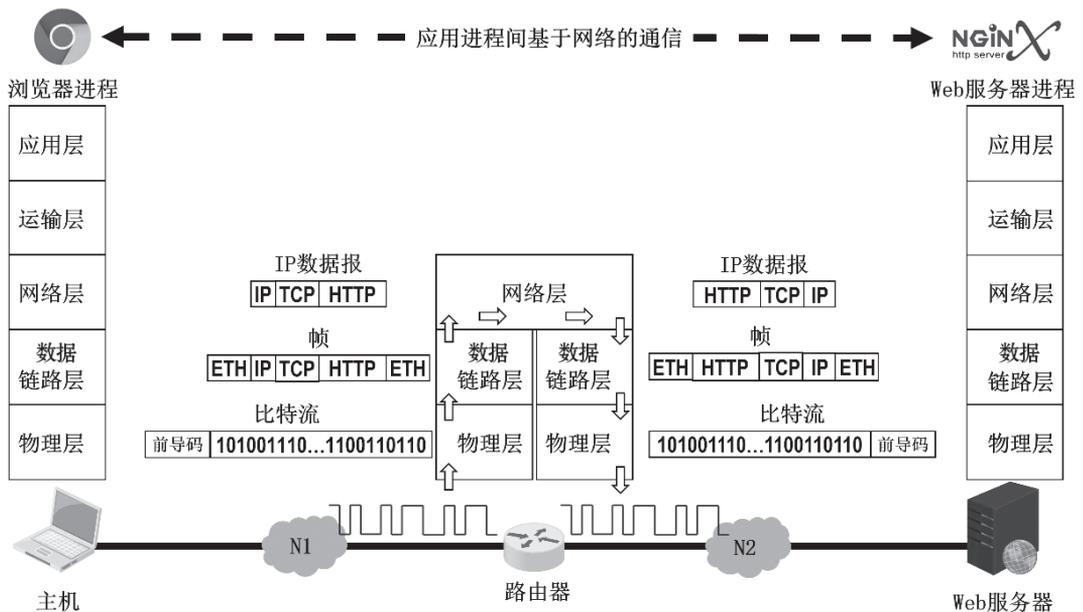


图1-57 路由器收到数据包后对其进行处理和转发

(1) (接收口的) **物理层**: 将收到的电信号转换成比特流, 并去掉前导码, 然后将帧向上交付给数据链路层。

(2) (接收口的) **数据链路层**: 去掉帧的首部和尾部后, 将IP数据报向上交付给网络层。

(3) **网络层**: 网络层从IP数据报的首部中提取出目的IP地址, 根据目的IP地址查找自己的转发表, 以便决定从哪个接口转发该IP数据报。与此同时, 还要对首部中的某些字段值(例如生存时间TTL字段的值)进行相应的修改, 然后将该IP数据报向下交付给数据链路层。

(4) (转发口的) **数据链路层**: 为IP数据报添加一个首部和一个尾部, 将其封装成帧, 然后将帧向下交付给物理层。

(5) (转发口的) **物理层**: 将帧看作比特流, 给其添加前导码后转变成相应的电信号发送出去。

3. Web服务器对数据包的处理过程

Web服务器收到数据包后, 按网络体系结构自下而上的顺序对其进行逐层解封, 解封出HTTP请求报文, 如图1-58所示。

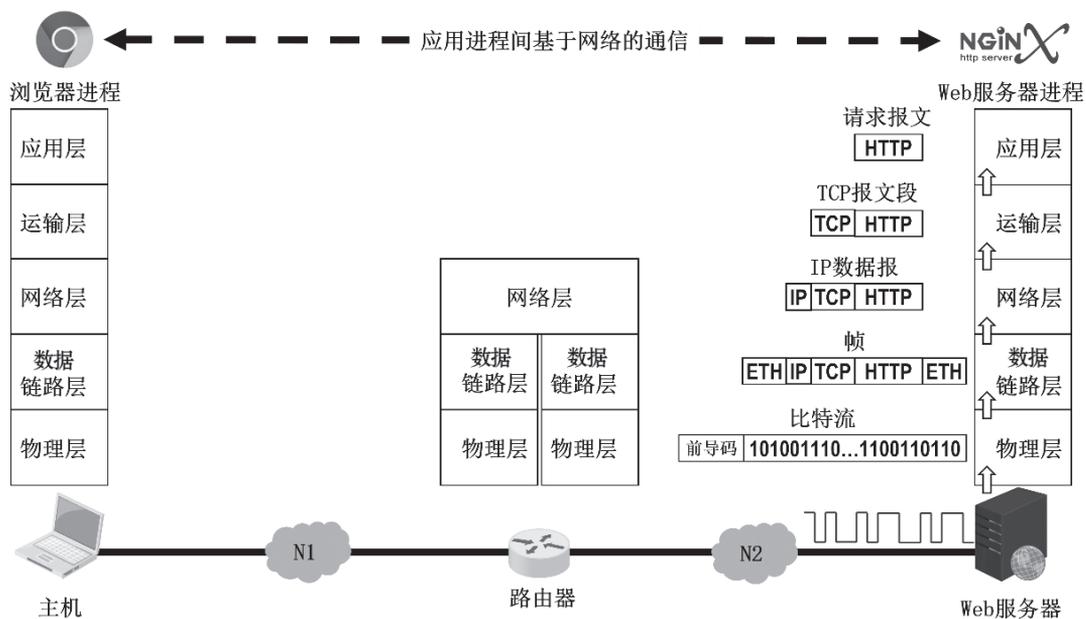


图1-58 接收方逐层解封数据包

4. Web服务器给主机发送HTTP响应报文的过程

Web服务器的应用层收到HTTP请求报文后执行相应的操作, 然后给主机发送包含有浏览器请求内容的HTTP响应报文。与浏览器发送HTTP请求报文的过程类似, HTTP响应报文需要在Web服务器层层封装后才能发送。数据包经过路由器的转发到达主机。主机对收到的数据包按网络体系结构自下而上的顺序逐层解封, 解封出HTTP响应报文。上述过程如图1-59所示。

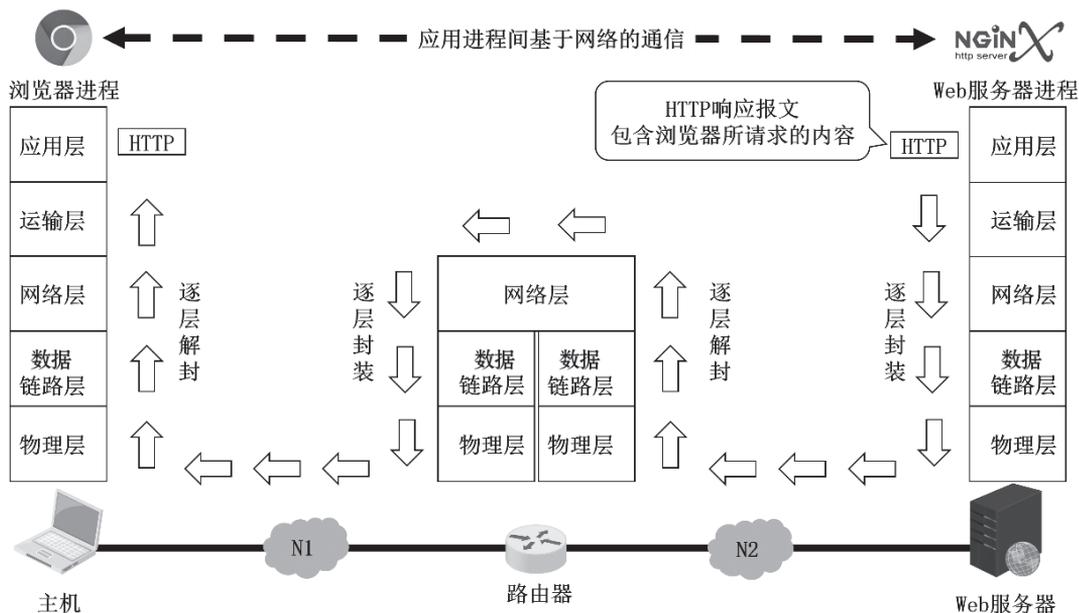


图1-59 Web服务器给主机发送HTTP响应报文

请读者理解并记住上述这个例子，因为本书的后续章节就是要围绕五层原理体系结构自下而上逐层展开的。

1.6.4 计算机网络体系结构中的专用术语

本节介绍计算机网络体系结构中的一些专用术语，以便读者对计算机网络体系结构有更深入的理解。请读者注意，这些专用术语来源于OSI的七层体系结构，但也适用于TCP/IP的四层体系结构和五层原理体系结构。



我们可以将这些专用术语中最具代表性的三个作为分类名称，它们分别是**实体**、**协议**以及**服务**。

1. 实体和对等实体

实体是指任何可发送或接收信息的硬件或软件进程。在图1-60所示的通信双方五层原理体系结构的各层中，我们用标有字母的小方格来表示实体。

有了实体的概念后就可以引出对等实体的概念了。

对等实体是指通信双方相同层次中的实体。如图1-61所示，实体A与实体F互为对等实体，实体B与实体G互为对等实体，实体C与实体H互为对等实体，实体D与实体I互为对等实体，实体E与实体J互为对等实体。



图1-60 实体的概念

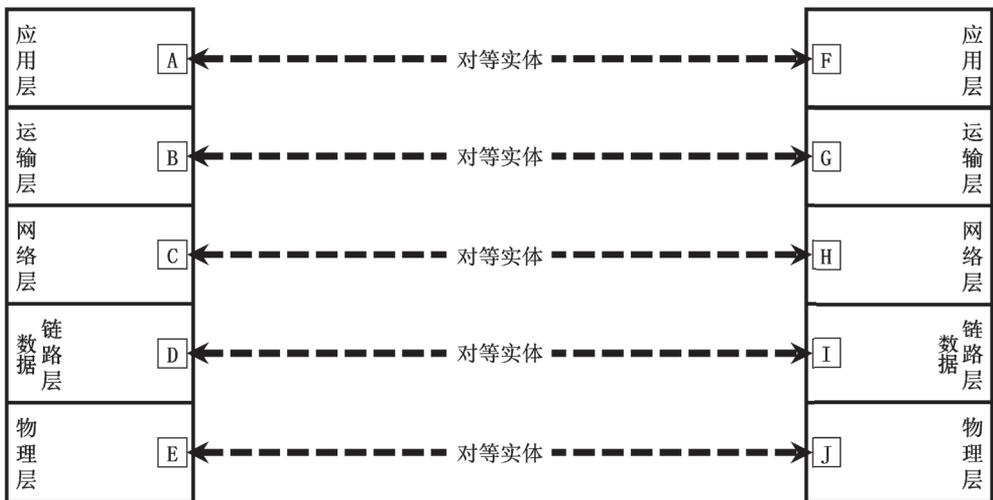


图1-61 对等实体的概念

请读者思考一下，根据实体和对等实体的概念，在图1-62中，属于收发双方物理层和数据链路层的网卡是否互为对等实体？属于收发双方应用层的浏览器进程和Web服务器进程是否互为对等实体？

回答是肯定的。网卡是可以发送或接收信息的硬件，它包括物理层和数据链路层。因此通信双方的网卡互为对等实体。位于收发双方应用层的浏览器进程和Web服务器进程，是可以发送或接收信息的软件进程，它们互为对等实体。

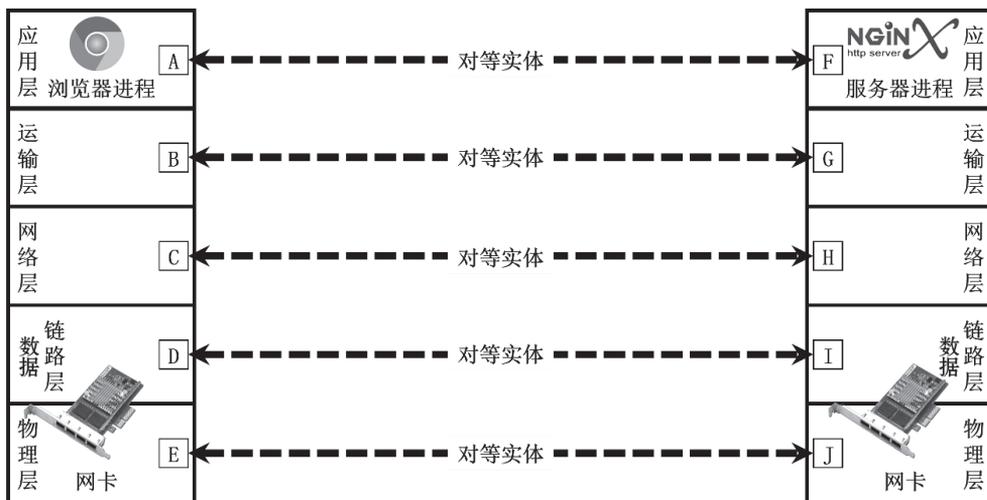


图1-62 对等实体举例

2. 协议

协议是控制两个对等实体在“水平方向”进行“逻辑通信”的规则集合。借助图1-63来理解：

- 物理层对等实体使用物理层协议进行逻辑通信，例如传统以太网使用曼彻斯特编码。
- 数据链路层对等实体使用数据链路层协议进行逻辑通信，例如传统以太网使用CSMA/CD协议。
- 网络层对等实体使用网络层协议进行逻辑通信，例如IP协议。
- 运输层对等实体使用运输层协议进行逻辑通信，例如TCP协议或UDP协议。
- 应用层对等实体使用应用层协议进行逻辑通信，例如HTTP协议、FTP协议以及SMTP协议等。

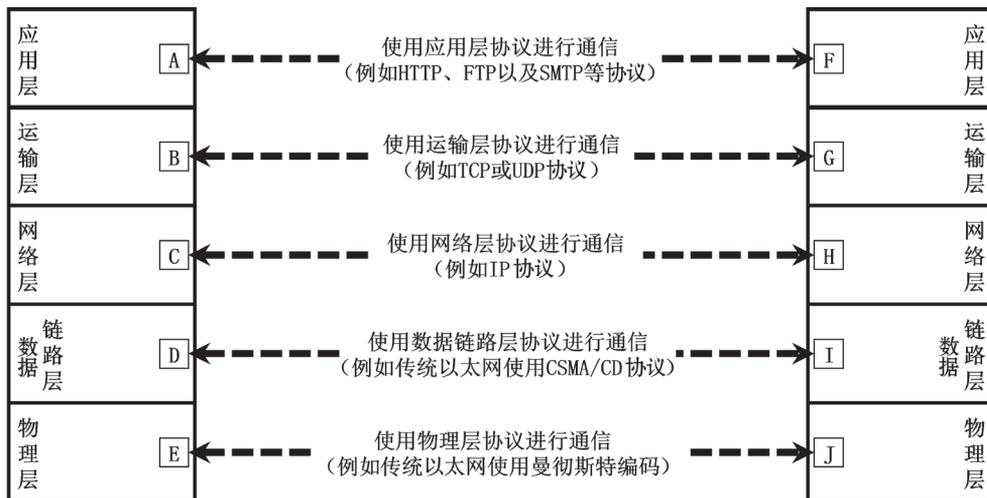


图1-63 协议的概念

请读者注意，将两个对等实体间的通信称为“逻辑通信”，是因为这种通信其实并不存在，它只是我们假设出来的一种通信。这样做的目的，是方便我们单独研究网络体系结构某一层时，不用考虑其他层。例如，当研究运输层时，可以假设只有运输层的对等实体在进行逻辑通信，而不用顾及其他各层。

计算机网络协议有三个要素。它们分别是**语法**、**语义**以及**同步**。

语法用来定义通信双方所交换信息的格式。如图1-64所示的是IPv4数据报格式，其中的每一个小格子称为**字段或域**，数字表示字段的长度，单位是位（也就是比特）。语法就定义了这些小格子的长度和先后顺序。



图1-64 IPv4数据报格式

请读者注意，我们没有必要记住每种数据报的格式。只要我们能看懂数据报的格式说明就可以了。当然了，如果读者将来会从事计算机网络相关的开发、教学以及研究等工作，像IP数据报、TCP报文段以及HTTP报文等这些常见的数据报格式，相信读者在学习和研究过程中自然而然就会记住了。

语义用来定义通信双方所要完成的操作。如图1-65所示的是主机访问Web服务器的简单示意图：

- (1) 主机给Web服务器发送一个HTTP的GET请求报文。
- (2) Web服务器收到GET请求报文后对其进行解析，就知道了这是一个HTTP的GET请求报文。
- (3) Web服务器就在自身内部查找主机所请求的内容，并将所找到的内容封装在HTTP的响应报文中发送给主机。
- (4) 主机收到HTTP响应报文后对其进行解析和渲染显示。

这个例子就可以体现出通信双方收到数据包后应完成怎样的操作。对于本例，这是HTTP协议的语义所定义的。

同步用来定义通信双方的时序关系。在图1-65所示的例子中，必须由主机首先发送

HTTP的GET请求报文给Web服务器；Web服务器收到主机发来的GET请求报文后，才可能给主机发送相应的HTTP响应报文。这是HTTP协议的同步所定义的。

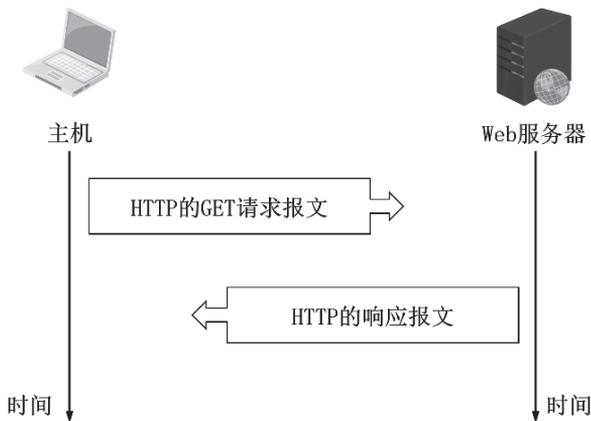


图1-65 主机访问Web服务器的简单示意

3. 服务

在协议的控制下，两个对等实体在水平方向的逻辑通信使得本层能够向上一层提供服务。要实现本层协议，还需要使用下面一层所提供的服务。借助图1-66来理解：

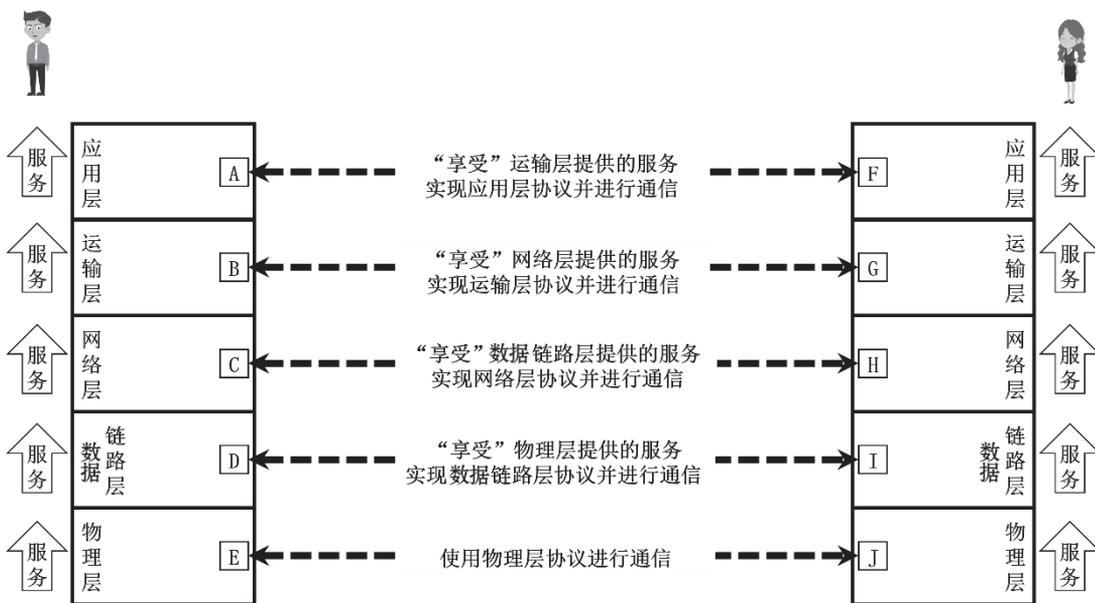


图1-66 服务的概念

- 物理层对等实体在物理层协议的控制下进行逻辑通信，进而向数据链路层提供服务。
- 数据链路层对等实体“享受”物理层提供的服务，并在数据链路层协议的控制下进行逻辑通信，进而向网络层提供服务。

- 网络层对等实体“享受”数据链路层提供的服务，并在网络层协议的控制下进行逻辑通信，进而向运输层提供服务。
- 运输层对等实体“享受”网络层提供的服务，并在运输层协议的控制下进行逻辑通信，进而向应用层提供服务。
- 应用层对等实体“享受”运输层提供的服务，并在应用层协议的控制下进行逻辑通信，给其上层（也就是用户）提供服务。

请读者注意，协议是“水平”的，而服务是“垂直”的。实体看得见下层提供的服务，但并不知道实现该服务的具体协议。换句话说，下层的协议对上层的实体是“透明”的。这就好比我们肯定看得见手机为我们提供的各种服务，但是我们只是享受这些服务，而没有必要每个人都弄懂手机的工作原理。

在同一系统中相邻两层的实体交换信息的逻辑接口称为**服务访问点**。服务访问点用于区分不同的服务类型。例如，数据链路层的服务访问点为帧的“类型”字段，网络层的服务访问点为IP数据报的“协议”字段，运输层的服务访问点为“端口号”字段。上层要使用下层所提供的服务，必须通过与下层**交换一些命令**，这些命令称为**服务原语**，如图1-67所示。

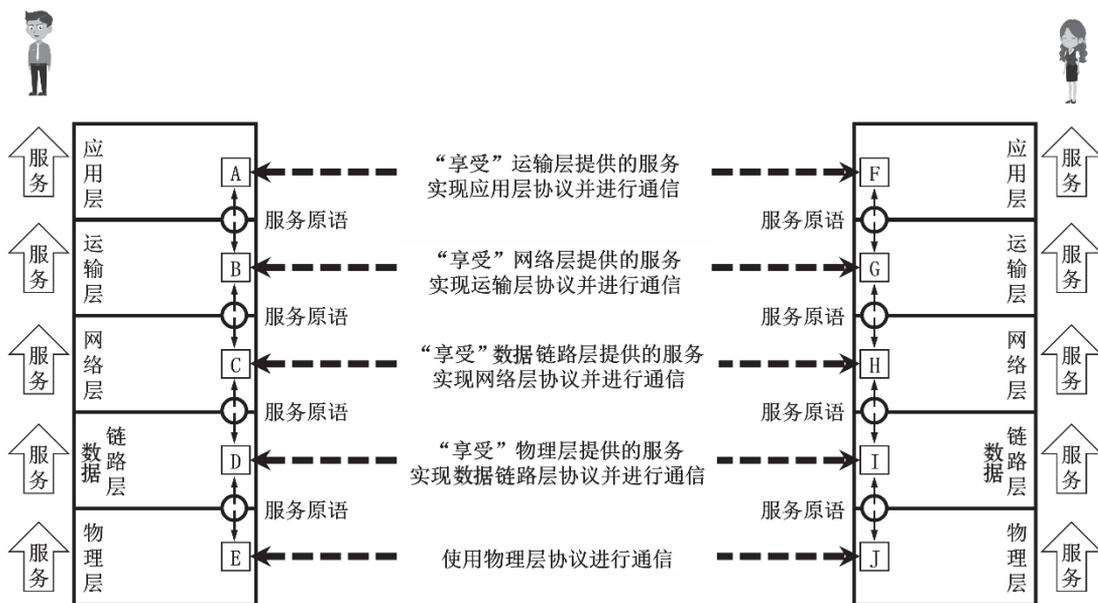


图1-67 服务访问点和 service 原语的概念

在计算机网络体系结构中，通信双方交互的数据包也有专门的术语。

对等层次之间传送的数据包称为该层的**协议数据单元**（Protocol Data Unit, PDU）。例如，物理层对等实体间逻辑通信的数据包称为**比特流**（bit stream）；数据链路层对等实体间逻辑通信的数据包称为**帧**（frame）；网络层对等实体间逻辑通信的数据包称为**分组**（packet），如果使用IP协议，也称为**IP数据报**；运输层对等实体间逻辑通信的数据包一般根据协议而定，若使用TCP协议，则称为**TCP报文段**（segment），若使用UDP协议，则称

为**UDP用户数据报**（datagram）；应用层对等实体间逻辑通信的数据包一般称为**应用报文**（message）。上述各层数据包可以统称为**协议数据单元**，如图1-68所示。

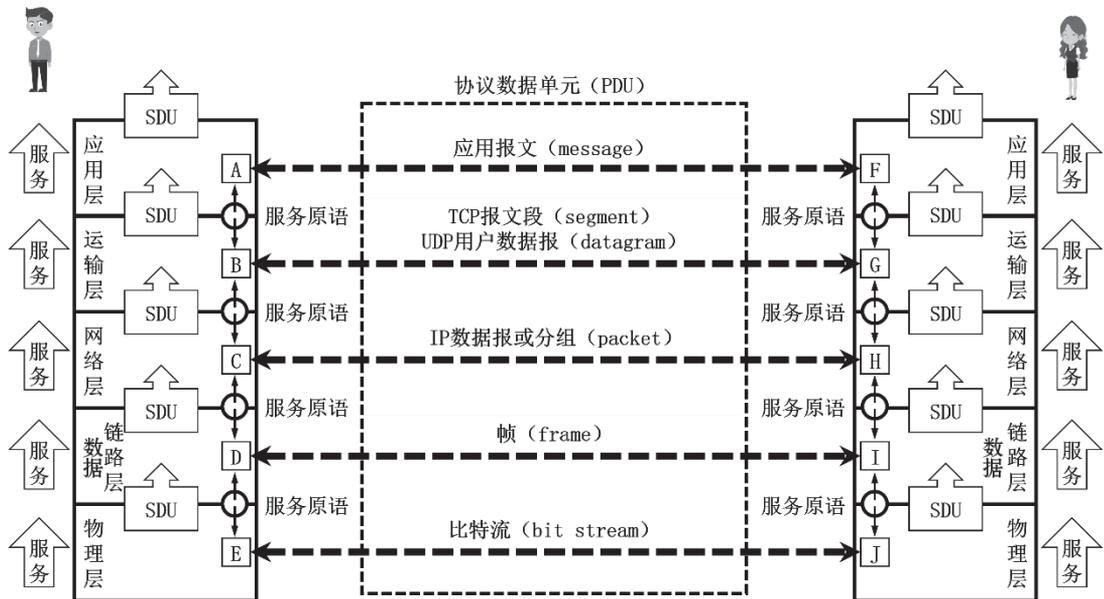


图1-68 协议数据单元和服务数据单元

在图1-68中，同一系统内层与层之间交换的数据包称为**服务数据单元**（Service Data Unit, SDU）。

多个SDU可以合成为一个PDU，而一个SDU也可划分为几个PDU。

请读者注意，本节的内容比较抽象。如果读者一时无法完全理解，请不要钻牛角尖，暂时放过去。随着读者对后续章节的学习，就会感觉到计算机网络体系结构不再抽象难懂，它的分层思想是多么优美的设计哲学，其中的这些术语又是多么贴切。

1.7 我国的计算机网络发展情况

本节向读者简要介绍我国的计算机网络发展历程，以及我国互联网最新发展情况相关资料的获取方法。

1.7.1 我国的计算机网络发展历程

为了让读者对我国计算机网络的发展历程有一个比较清晰地了解，表1-4列出了我国计算机网络的简要发展历程。

表1-4 我国计算机网络的简要发展历程

| 时 间 | 发 展 情 况 |
|------------|-------------------|
| 1980年 | 铁道部开始进行计算机联网实验 |
| 20世纪80年代初期 | 国内许多单位相继部署了大量的局域网 |

续表

| 时 间 | 发展情况 |
|------------|--|
| 20世纪80年代后期 | 军队、公安、银行以及其他一些部门相继建立各自的专用计算机广域网 |
| 1989年11月 | 我国第一个公用分组交换网CNPAC建成运行 |
| 1994年4月20日 | 我国用64kb/s专线正式接入因特网。从此，我国被国际上正式承认为接入因特网的国家 |
| 1994年5月 | 中科院高能物理研究所设立了我国的第一个万维网服务器 |
| 1994年9月 | 中国公用计算机互联网CHINANET正式启动 |
| 2004年2月 | 我国的第一个下一代互联网CNGI的主干网CERNET2试验网正式开通 |
| 到本书写作时为止 | 我国陆续建造了基于互联网技术并能够和因特网互连的多个全国范围的公用计算机网络，其中规模最大的就是下面这五个： (1) 中国电信互联网CHINANET (2) 中国联通互联网UNINET (3) 中国移动互联网CMNET (4) 中国和科研计算机网CERNET (5) 中国科学技术网CSTNET |

对我国互联网应用推广普及起着非常积极作用的人物和事件众多，表1-5列出了典型的几例。

表1-5 推动我国互联网应用普及的典型人物和事件

| 时 间 | 人物和事件 |
|-------|---|
| 1996年 | 张朝阳创立了中国第一家以风险投资资金建立的互联网公司——爱特信公司，后来发展成为中国首家大型分类查询搜索引擎公司——搜狐公司（Sohu）。搜狐网站（Sohu.com）目前是国内知名的综合门户网站 |
| 1997年 | 丁磊创立了网易公司（NetEase），推出了中国第一家中文全文搜索引擎。网易公司还开发了163和126等超大容量免费电子邮箱。网易网站（163.com）目前也是国内知名的综合门户网站 |
| 1998年 | 王志东创立了新浪网站（Sina.com），该网站目前已成为全球最大的中文综合门户网站。新浪微博是全球使用最多的微博之一 |
| 1998年 | 马化腾和张志东创立了腾讯公司（Tencent）。腾讯公司的即时通信软件QQ目前已经发展成为一款集语音、视频、音乐、图片、短信于一体的网络社交工具，成为几乎所有网民都在电脑和智能手机中安装的软件，腾讯公司也因此成为中国最大的互联网综合服务提供商之一 |
| 1999年 | 马云创立了阿里巴巴网站（Alibaba.com），它是一个企业对企业的网上贸易市场平台 |
| 2000年 | 李彦宏和徐勇创立了百度网站（Baidu.com），现在已成为全球最大的中文搜索引擎 |
| 2003年 | 马云创立了淘宝网（Taobao.com），它是一个个人网上贸易市场平台 |
| 2004年 | 阿里巴巴集团创立了第三方支付平台——支付宝（Alipay.com），为中国电子商务提供了简单、安全、快捷的在线支付手段 |
| 2011年 | 腾讯推出了专门供智能手机使用的即时通信软件“微信”（WeChat）。该软件是在著名的电子邮件客户端软件Foxmail的作者张小龙的领导下成功研发的。目前几乎所有的智能手机用户都在使用微信。装有微信软件的智能手机，已从简单的社交工具演变成一个具有支付能力的全能钱包 |

1.7.2 我国互联网发展情况相关资料的获取

中国互联网络信息中心（China Network Information Center, CNNIC）每年会发布两次我国互联网络发展状况统计报告。读者可在其网站www.cnnic.cn上查询和下载最新的相关文档。

CNNIC于2022年2月发布了第49次《中国互联网络发展状况统计报告》，其中的核心数据如表1-6所示。

表1-6 第49次《中国互联网络发展状况统计报告》中的核心数据（截至2021年12月）

| 项 目 | 基础数据 |
|------------------|--|
| 我国网民规模 | 10.32亿，较2020年12月增长4296万，互联网普及率达73.0%，较2020年12月提升2.6个百分点 |
| 我国手机网民规模 | 10.29亿，较2020年12月增长4298万，网民使用手机上网的比例为99.7% |
| 我国农村网民规模 | 2.84亿，占网民整体的27.6%；城镇网民规模达7.48亿，占网民整体的72.4% |
| 使用各类设备上网比例 | 我国网民使用手机上网的比例达99.7%；使用电视上网的比例为28.1%；使用台式电脑、笔记本电脑、平板电脑上网的比例分别为35.0%、33.0%和27.4% |
| 我国IPv6地址数量 | 62052块/32，较2020年12月增长9.4% |
| 我国域名总数 | 3593万个。其中，“.CN”域名数量为2041万个，占我国域名总数的56.8% |
| 我国即时通信用户规模 | 10.07亿，较2020年12月增长2555万，占网民整体的97.5% |
| 我国网络视频（含短视频）用户规模 | 9.75亿，较2020年12月增长4794万，占网民整体的94.5%；其中，短视频用户规模达9.34亿，较2020年12月增长6080万，占网民整体的90.5% |
| 我国网络支付用户规模 | 9.04亿，较2020年12月增长4929万，占网民整体的87.6% |
| 我国网络购物用户规模 | 8.42亿，较2020年12月增长5968万，占网民整体的81.6% |
| 我国网络新闻用户规模 | 7.71亿，较2020年12月增长2835万，占网民整体的74.7% |
| 我国网上外卖用户规模 | 5.44亿，较2020年12月增长1.25亿，占网民整体的52.7% |
| 我国在线办公用户规模 | 4.69亿，较2020年12月增长1.23亿，占网民整体的45.4% |
| 我国在线医疗用户规模 | 2.98亿，较2020年12月增长8308万，占网民整体的28.9% |

本章知识点思维导图请扫码获取：

