

第 1 章

计算机网络的语言—— 理解计算机网络协议

对于计算机网络的初学者来说，学习计算机网络最重要的部分是理解什么是网络协议以及网络协议是怎样工作的。大多数的初学者都会觉得网络协议是一个很抽象的东西，既看不见也摸不着，因此，对网络协议的理解也成为计算机网络初学者学习的难点之一。为此，我们将计算机网络协议作为本书的第 1 章，以一个从网络上捕获的数据包为基础，分析计算机网络协议的体系结构，进而帮助初学者理解各层协议的工作原理。

1.1

什么是网络协议

什么是网络协议呢？让我们百度一下吧，百度的解释是：网络协议是为计算机网络中数据进行交换而建立的规则、标准或约定的集合。

这个概念听起来很抽象，那么先让我们思考一下为什么会有网络协议，也就是网络协议的目的是什么。根据它的定义可知，网络协议的目的是为了在计算机网络中进行数据交换。我们知道计算机网络就是把分布在不同地方的计算机连接起来，然后通过计算机之间进行的数据交换来完成各种各样的网络功能。但计算机不是人，它怎么知道别的计算机发送过来的数据是什么意思呢？因此，我们人为地制定了计算机之间进行数据交换的规则、标准或约定，称之为协议。也就是说，计算机之间在进行数据交换时，只要大家都遵守同一协议，那么它们就能知道对方发送的数据是什么含义，或者自己要发送什么格式的数据才能让对方计算机明白应该做怎样的操作。

网络协议的功能基本上是用计算机软件来实现的，一般来说，只要我们安装了操作系统，无论是 Windows 系统、Linux 系统还是其他系统，计算机都会默认安装与系统相对应的常用网络协议的支持，如 TCP/IP 协议的支持。

在介绍网络协议时，都会提到网络协议的三要素：

(1) 语义。语义解释控制信息每个部分的意义，它规定了需要发出何种控制信息，完成什么样的动作和做出什么样的响应。

(2) 语法。语法是用户数据与控制信息的结构与格式，以及数据出现的顺序。

(3) 时序。时序是对事件发生顺序的详细说明，也可称为“同步”。

可以简单地把这三个要素描述为：语义表示要做什么，语法表示要怎么做，时序表示做的顺序。

网络协议三要素看起来很抽象，但我们可以把计算机之间的通信与人类之间的交流作一个类比：人类之间最直接的交流是通过语言，大家都学过语文，其实语义、语法、时序这些概念在我们学习语文时都会用到，只不过叫法可能不同而已；人类之间如果希望共同完成一件事，那么他们可以通过语言进行交流，这些语言也包含了语义、语法及时序的规则，而且这些规则必须是一致的，这样人类才能互相理解，就比如你若是不懂英语，就无法和一个说英语的外国人用语言进行交流；在计算机网络中，计算机之间进行交流的“语言”就是网络协议，计算机要共同完成某种功能，必须保证它们能够相互理解通过网络传递的数据，也就是说它们必须遵守同一网络协议，即使用同一“语言”，告诉对方要做什么（语义）、要怎么做（语法）、做的顺序（时序）。但有一个基本概念需要注意，计算机本身是没有“语言”的，所有的这些协议都是人们为了让计算机能够相互理解、协同工作而人为制定的标准和规则。

1.2 网络协议的体系结构

要让计算机相互理解、协同工作可不是一件容易的事，计算机网络要完成的功能也是各种各样的，怎样设计才能够使整个网络协议的结构更加清晰、实现更为容易、修改更为方便呢？目前使用的网络协议大都采用分层体系结构。

那么，什么是分层体系结构呢？分层体系结构来源于对整个网络协议体系的设计思路，由于网络协议是帮助计算机之间互相理解、相互协作来完成各种网络功能的，如果只用一个协议的话很难实现所有功能，并且实现相当复杂，修改也极不方便。因此，网络协议体系设计的主要思路是把一个复杂的功能划分为更小的功能模块，我们把这些小的功能模块称为“层”，每层实现部分的网络功能，所有层一起完成完整网的络功能。

1.3 ISO/OSI RM

1. ISO/OSI RM 简介

ISO/OSI RM 的全称是 International Organization for Standardization/Open System Interconnect Reference Model，翻译成中文为：国际标准化组织 / 开放系统互联参考模型。它是计算机网络协议分层体系结构的国际标准，如果希望实现不同开放系统之间的相互通信，可以参照它的分层模型进行协议的体系设计。ISO/OSI RM 共分为 7 层，从低到高分别为 1~7 层，如图 1-1 所示。

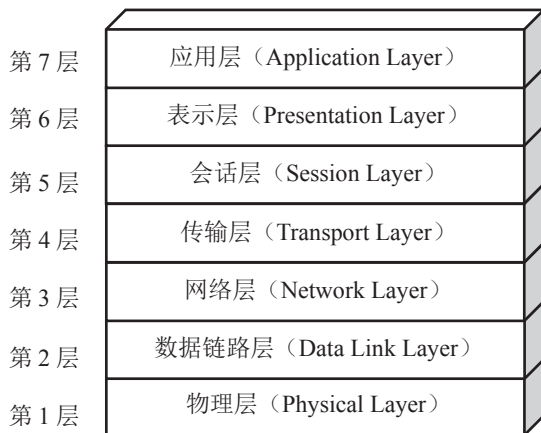


图 1-1 ISO/OSI RM 分层体系结构示意图

2. ISO/OSI RM 各层功能

(1) 物理层：物理层协议是一些标准和规范，这些大家都共同遵守的物理层协议

使数据能够通过物理介质从一方传递到另一方。物理层协议主要关注的是物理连接的机械、电气、功能和规程特性，简单地说就是规定接口的几何形状是什么样的，多少伏电压代表 1，多少伏电压代表 0，时钟速率是多少，采用什么样的编码，采用全双工还是半双工传输等，它并不关心要传输的数据是什么含义，只负责保证数据能够在物理介质上传输。像网络里面用得最多的以太网标准及通信常用的 RS-232（通常叫串口）标准中，都有相关的物理层协议。

（2）数据链路层：数据链路层协议的主要功能是保证有链路连接的主机之间或同一网络主机之间数据的正确传输，即点到点的数据的正确传输。为此，它需要定义设备的硬件地址，以便能够准确找到该设备；还要定义设备在使用公用传输介质时，如何控制应该由哪个设备占用公用传输介质来传输数据；为了保证传输数据的正确性，还需要定义如何保证发送方与接收方的数据同步及差错检测方法等。常用的数据链路层协议有以太网的数据链路层协议及 HDLC 协议（高级数据链路协议，High-Level Data Link Protocol）等。

（3）网络层：网络层协议的主要功能是使数据包能够跨越多个网络，从一端的主机顺利到达远端主机。为了能够跨越不同的网络，在网络层需要定义统一的逻辑通信地址来标识源主机和目的主机。另外，网络层需要解决的问题是：当数据包通过多个网络传输时，它可能有多条路径可以到达目的地，如何才能选择一条最优的路径；当网络出现故障时如何调整最优路径；如何解决网络拥塞等。网络层协议包括著名的 IP 协议及各种动态路由协议等。

（4）传输层：传输层协议的主要功能是为主机里的不同应用提供端到端的传输服务。即使网络层协议已经能够保证数据从一个源主机到达另一个远端主机，但主机里可以有很多应用，这些应用数据是一个网页数据、一条 QQ 消息还是通过 FTP 下载的视频呢？这些数据是不是可靠的、完整的？这些问题都是由传输层协议来处理的，因此，传输层需要为不同的应用定义不同的服务访问点，以区分为不同的应用提供的传输服务；同时还要定义完善的差错处理机制及流量控制机制，以保证不同的应用只需要使用传输层提供的服务，就一定能够将数据传输到远端的对等应用进程，如果多次传输也不能将数据传输到目的应用进程，就通知源应用进程目的不可达。常见的传输层协议有 TCP 协议和 UDP 协议等。

（5）会话层：若传输层已经能够为两个远程主机的应用提供传输服务了，则可以简单地认为使用传输层可以在两个远程主机的应用之间建立起一个连接。在这个连接之上，应用进程之间还可以建立多个逻辑会话，会话层的功能就是对这些逻辑会话进行管理，包括建立、维护及终止会话等。

（6）表示层：如果两个主机对数据的表示方法不一致，就算数据能够在不同的应用进程之间正确传输，主机依然无法理解这些数据的含义，这就需要使用到表示层协议。表示层协议定义统一的数据表示方式，源主机通过表示层协议将自己特有的数据格式转换成标准的数据格式发送出去，目的主机再通过表示层协议将标准的数据格式转换为自己特有的数据格式，这样双方就能相互通信了。根据这个定义，网络数据加密功能也属于表示层协议功能，只不过这种数据格式是一种统一的加密格式而已。

(7) 应用层：应用层协议是为了实现网络上各种各样的网络服务而制定的协议，不同的应用使用不同的应用层协议，或者说应用程序使用不同的应用层协议来实现不同的网络功能。因此，应用层协议也是所有层次中包括协议最多的，如 HTTP 协议、DNS 协议、FTP 协议、TELNET 协议等等。

3. ISO/OSI RM 的工作模式

了解 OSI 参考模型 7 层协议的功能后，我们来了解一下它们的工作模式，即这 7 层协议是怎样相互协作共同完成网络通信功能的，如图 1-2 所示。OSI 参考模型中的 7 层协议，在整个体系结构中，根据实现的功能不同有其固定的位置，位于某层协议上方的叫上层协议，位于某层协议下方的叫下层协议。物理层协议与物理介质密切相关，它能实现透明比特流传输，位于整个体系结构的最下层，而应用层协议实现某种应用的功能，与应用进程相关，位于整个体系结构的最上层。从图 1-2 可以看出，每个下层协议只与相邻的上层协议通信，即下层协议通过自己所完成的功能为相邻的上层协议提供服务，而上层协议使用相邻的下层协议提供的服务完成自己的功能，并用自己的功能为与自己相邻的上层协议提供服务。

因此，从协议功能实现的角度上来看，是自下而上实现的，物理层是基础，只有实现了物理层功能，数据链路层才能在物理层的基础上实现其功能，而网络层才能在数据链路层的基础上实现其功能，依此类推。任何一个高层协议要实现其功能，必须依靠所有的下层协议一起完成，它是不能够孤立存在的，否则只能是空中楼阁。

从应用进程发送与接收数据的角度来看数据在各层协议间的传递，如图 1-2 所示。如果应用进程 A 想发送数据给应用进程 B，在主机 A 中，应用进程 A 将要发送的数据交给相应的应用层，应用层处理后交给表示层，表示层处理后交给会话层，依此类推，最后由物理层处理后交给传输介质进行传输；在主机 B 中，数据的接收是一个相反的过程，物理层处理传输介质传来的信号，转换成比特流交给数据链路层，数据链路层处理后交给网络层，依此类推，最后应用层处理后交给应用进程 B。从应用进程 B 发送数据到应用进程 A 的过程与此类似。通过以上步骤即可实现两个远端应用进程的数据交换。

站在主机 A 中应用进程 A 的角度，应用进程 A 只和应用层通信，它并不知道应用层功能在应用层内部是如何实现的，也不知道应用层的下面是否还有其他层，还有几层等等，它只知道通过某种应用层协议能够实现某种功能，只要把数据交给应用层，就能将数据传递到主机 B 的应用进程 B。对于应用进程 A 和 B 来说，它们之间好像可以“直接”通信。

同理，对于体系结构中的每一层来说，它们都只负责处理相邻上层协议传递来的数据或要传递给相邻上层协议的数据，同时需要从相邻下层协议获得要传递给上层协议的数据，或将处理过的上层协议的数据传递给相邻的下层协议。对于每层协议而言，它们会“感觉”到可以通过相邻的下层协议实现与远端相同层次的协议之间的数据交流，而且对数据做的任何处理也只有远端相同层次的协议才能理解，因此我们称相同层次的协议为对等层协议，如主机 A 的网络层协议与主机 B 的网络层协议，它们使用的是

同一协议，可被称为对等层协议。也就是说，对于位于不同主机的两个相同层次的协议，它们之间的数据传递实际上需要经过它们下面的每一层协议和物理介质，但就实际的效果而言，是它们之间实现了数据传递，如果屏蔽下层所有细节，我们也可以简单地认为，对等层协议之间可以相互“直接”通信，在图 1-2 中，用双箭头虚线表示对等层协议之间的通信，而带箭头的实线则表示实际数据传递的情况。

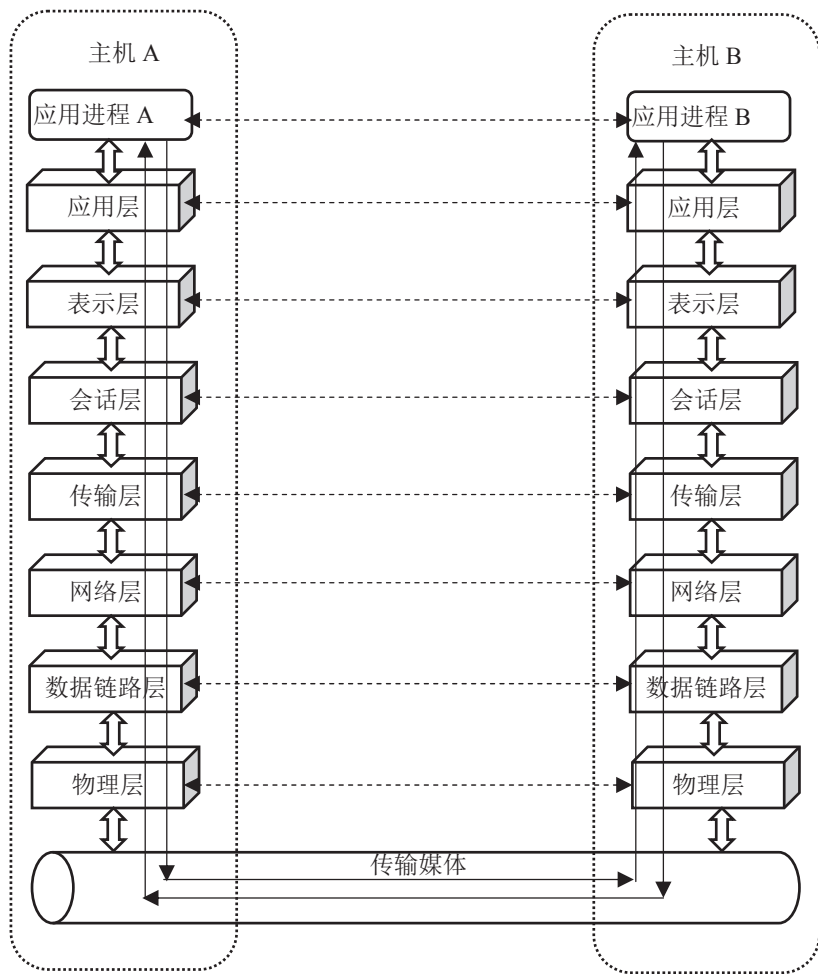


图 1-2 ISO/OSI RM 的工作模式

1.3.1 TCP/IP 协议族

ISO/OSI RM 是国际标准化组织制定的标准，但它只是一个理论上的国际标准，而大多数计算网络，特别是如今使用最广泛的 Internet（因特网），实际上使用的标准是 TCP/IP 协议。

TCP/IP 协议其实是由许多协议组成的一个庞大的协议集合，它包含数量众多的协议，不同的协议实现不同的功能，而 TCP（Transmission Control Protocol，传输控制协议）

和 IP (Internet Protocol, 网际协议) 是其中最为重要的两个协议, 因此 TCP/IP 协议族通常简称为 TCP/IP 协议。

TCP/IP 协议也采用分层体系结构, 如图 1-3 所示。

TCP/IP 协议的体系结构共分为 4 层, 从下到上分别为网络接口层、网络层、传输层和应用层。TCP/IP 协议的主要目的是实现不同网络在 IP 层上互联, 因此主要定义网络层、传输层和应用层协议, 而不同网络的物理层及数据链路层协议由不同的组织及标准制定, 因此 TCP/IP 协议还定义了针对不同网络的接口层。

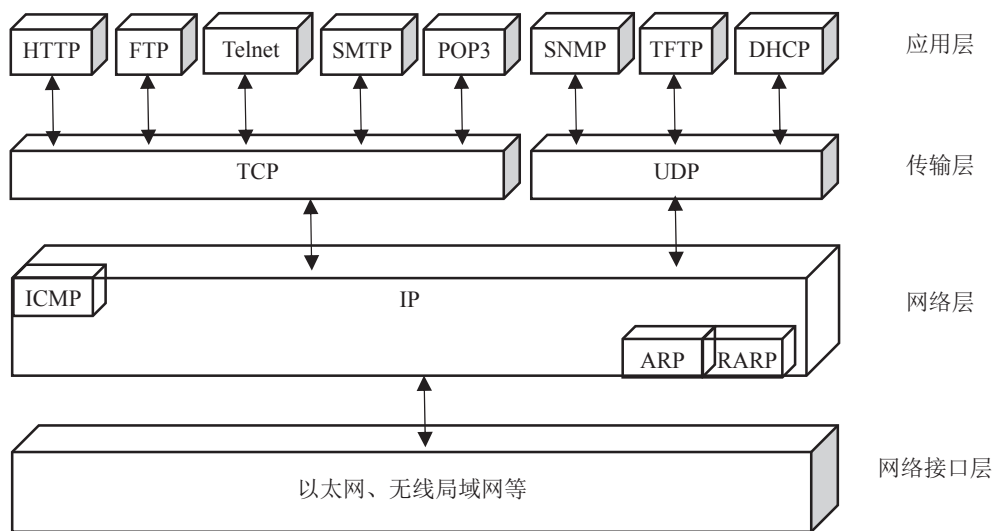


图 1-3 TCP/IP 协议体系结构图

1. 应用层协议

在图 1-3 中, 最高层为应用层, 该层针对不同的网络应用制定了不同的应用层协议。

HTTP: HyperText Transfer Protocol, 超文本传输协议, 我们在浏览网页时, 浏览器使用 HTTP 协议从 Web 服务器上传网页。

FTP: File Transfer Protocol, 文件传输协议, 用于网络上文件的上传与下载。

Telnet: 远程登录协议, 用于远程登录到服务器。

SMTP: Simple Mail Transfer Protocol, 简单邮件传输协议, 负责电子邮件的发送。

POP3: Post Office Protocol - Version 3, 邮局协议—版本 3, 负责电子邮件的接收。

SNMP: Simple Network Management Protocol, 简单网络管理协议, 用于网络管理。

TFTP: Trivial File Transfer Protocol, 简单文件传输协议, 用于传输简单文件。

DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol, 动态主机配置协议, 为客户机自动分配相关网络配置信息。

2. 传输层协议

应用层下面是传输层，TCP/IP 协议在传输层提供两个协议。

TCP: Transmission Control Protocol, 传输控制协议, 为应用层协议提供面向连接的、可靠的端到端连接服务。使用 TCP 作为传输层协议的应用层协议有: HTTP、FTP、Telnet、SMTP、POP3 等。

UDP: User Datagram Protocol, 用户数据报协议, 为应用层协议提供面向无连接的、不可靠但更为简单迅速的传输服务。使用 UDP 作为传输层协议的应用层协议有: SNMP、TFTP、DHCP 等。

3. 网络层协议

传输层下面是网络层, 网络层的主要协议只有一个。

IP: Internet Protocol, 网际协议, 通过定义统一的 IP 地址, 实现不同网络互联的协议。

除 IP 协议外, 为配合互联网络正常的工作, TCP/IP 协议还定义了一些其他的协议, 由于这些协议有些直接使用 IP 协议, 有些为 IP 协议提供地址转换功能, 因此把这些协议都归于网络层协议。

ICMP: Internet Control Message Protocol, Internet 控制消息协议, 用于在 IP 主机和路由器之间传递控制消息。

ARP: Address Resolution Protocol, 地址解析协议, 根据 IP 地址获取物理地址。

RARP: Reverse Address Resolution Protocol, 反向地址解析协议, 用于根据物理地址获取 IP 地址。

4. 网络接口层

网络接口层对应于不同种类的网络, 如以太网、无线局域网等, 相关协议后面介绍。

上面提到的协议, 是 TCP/IP 协议中较常使用的协议, 关于协议的具体情况将在后文中介绍。此外, 这些协议并不是 TCP/IP 协议的全部, 还有一些协议没有列出来, 在用到时再详细介绍。

1.3.2 ISO/OSI RM 与 TCP/IP 协议的关系

ISO/OSI RM 与 TCP/IP 协议体系结构的对应关系如图 1-4 所示。

TCP/IP 协议的应用层对应了 ISO/OSI RM 的最高三层, 网络接口层对应 ISO/OSI RM 的最低两层。TCP/IP 协议是网络协议的事实标准, 因此我们将进一步根据 TCP/IP 协议体系结构来介绍各层的具体协议。由于网络接口层对应不同的网络, 将有不同的数据链路层协议和物理层协议, 因此对于不同的实际网络来讲, 它的网络协议可以看作是一个 5 层的体系结构, 后面将以 5 层体系结构来讨论具体的网络协议。实际网络协议的 5 层体系结构如图 1-5 所示。

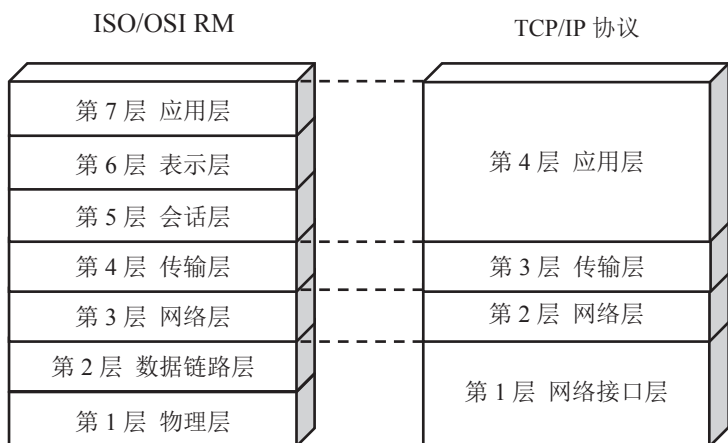


图 1-4 ISO/OSI RM 与 TCP/IP 协议体系结构的对应关系

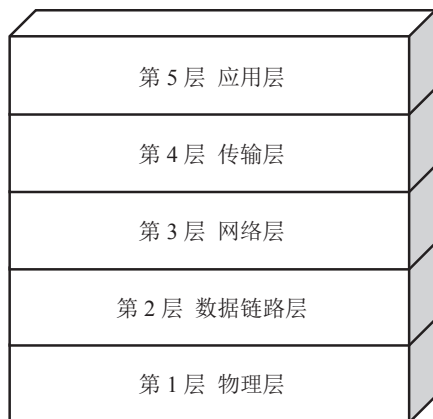


图 1-5 实际网络协议体系结构

1.4

物理层协议

1.4.1 物理层协议基础

简单地说，物理层协议的功能是实现透明比特流传输。也就是说，只要通信双方共同遵守相同的物理层协议，就能够将比特流（或者说由 0 和 1 构成的数据流，如 10100111……）通过不同的物理介质传送到对方。物理层协议就像一个搬运工，它并不知道它所传输的数据有什么具体含义，它只负责怎样把数据通过传输介质从一端传到另一端。因此物理层协议的主要任务就是规定各种传输介质和接口与传输信号相关的一些特性。

1. 机械特性

即物理特性，指明通信实体间硬件连接接口的机械特点，如接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等，如在网络中常用的RJ45水晶头的形状、大小、引线数目、如何连接网线及如何锁定在接口中等等。

2. 电气特性

规定了在物理连接上，导线的电气连接及有关电路的特性，一般包括接收器和发送器电路特性的说明、信号的识别、最大传输速率的说明、与互连电缆相关的规则、发送器的输出阻抗、接收器的输入阻抗等电气参数，如在以太网中，使用什么样的信号来表示0或1，怎样识别0和1，采用什么样的数据编码等与电气相关的特性。

3. 功能特性

指明物理接口各条信号线的用途（用法），包括接口线功能的规定方法，接口信号线的功能分类（数据信号线、控制信号线、定时信号线和接地线4类），如在以太网中，每根线的功能是什么，是用于发送数据还是接收数据等。

4. 规程特性

指明利用接口传输比特流的全过程及各项用于传输的事件发生的合法顺序，包括事件的执行顺序和数据的传输方式，即在物理连接建立、维持和交换信息时，双方在各自电路上的动作序列，如在网络中实现物理信号传输的整个过程的规定。

对于不同种类的网络连接来说，它们关于物理层的这些规定是不相同的，即使是同一类网络，如平时最常见的局域网，对于不同的传输介质，如同轴电缆、双绞线、光纤、无线，对应的物理层协议也不相同，因此物理层协议的种类是很多的，本书并不对某一具体的物理层协议作介绍，只希望大家能够理解物理层协议的基本作用是透明传输比特流，以及为了完成功能，它大致会定义哪些方面的特性。此外，计算机网络的本质是数据通信，因此要进一步理解物理层协议，就需要对数据通信的基础知识有一定的了解，下面我们来学习一些数据通信的基础知识。

1.4.2 数据通信基本概念

1. 数据、信号与信道

简单地说，数据是用来表示信息的，而信号是用来承载数据的，信道则是用来传输信号的通道。

（1）数字数据与模拟数据

当我们把信息表示成数据（可以理解为数值）时，分为两种：一种是模拟数据，它的取值是连续的并可以有无穷个取值，如连续函数 $y=f(x)$ ；另一种是数字数据，它的取值是不连续的并只包含有限个取值，如二进制串10110101。

（2）数字信号与模拟信号

数据只是较为抽象的数值，要把这些数据传递给其他人必须把数据用现实生活中