第1章

网络体系结构(Network Architecture)

物质、能量和信息是构成客观物质世界的三大要素,如图 1-1 所示它们之间的关系如图 1-2 所示。

图 1-1　物质、能量和信息是构成世界的三大要素

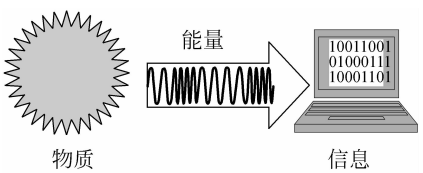

图 1-2　物质、能量和信息之间的关系

信息是物质在空间和时间上分布的不均匀程度,或者说信息是关于物质运动的状态和规律的形式化标识。通过采集物质的能量得到信息,对信息的处理和加工也需要能量。

对信息的研究包括信息的获取、传输、存储和处理等,计算机网络或数字网络主要研究的是信息传输这个环节,就是利用通信设备和线路将地理位置不同的、功能独立的多个计算机系统互连起来,以功能完善的网络软件(即网络通信协议、信息交换方式和网络操作系统等)实现网络中的资源共享和信息传递。

网络的基础是通信,通信就是在信源和信宿之间传递信息,双方的正确通信需要有一定的规程来约束,即协议(protocol)。由于协议越来越复杂,因而被分成不同的层次,每一层协议以数据单元形式出现,称为协议数据单元(protocol data unit,PDU)。

1.1　信息传输单位(Information Transfer Unit)

正确理解掌握信号、数据和信息这几个术语的含义,才能理解数据通信系统的实质问题(如信源、信道和编码等),从而把网络通信抽象成一个模型,统一研究。

1.1.1 信息、数据和信号(Information, Data and Signal)

信息是对数据进行加工以后所得到的,有助于人们消除对某一方面的不确定性,计算机网络是一种信息网络。

对收信者来说,一条消息所包含信息的多少,与其收到该消息前对某事件存在的不确定性程度有关。1948 年,美国数学家和工程师、信息论的主要奠基人香农(Claude E. Shannon)在《贝尔系统技术》杂志上发表了一篇著名论文"通信的数学理论"。在这篇文章中,香农并没有直接从文字上来表示信息的定义,他把信息定义为熵的减少。换句话说,他把信息定义为"用来消除不确定性的东西",因为熵是不确定性的度量,熵的减少就是不确定性的减少。

信息网络的目的是交换信息,信息的载体可以是数字、文字、语音、图形或图像等,转换成数据后就可以用计算机来处理和传输。

数据是任何描述物体、概念、情况和形势的事实、数字、字母和符号等。数据可以在物理介质上记录或传输,并通过外围设备被计算机接收,经过处理而获得结果。数据中包含着信息,信息是通过解释数据而产生的。所谓交换信息,就是访问数据及传输数据。

在计算机系统中,各种字母、数字、符号的组合和语音、图形、图像等统称为数据,以二进制代码表示,即以"0"和"1"比特序列构成。

数据在通信线路中进行传输时必定要表现为一定物理量的变化,这些变化的物理量称为信号。例如,电路中电压的大小和正负,电流的大小和方向,电压的波形,电磁场的大小、方向以及光波的幅度变化和颜色变化(频率或波长的变化)等。

信号是数据的具体表示形式。通信系统中所使用的信号可以是电信号,即随时间变化的电压或电流;也可以是光信号。在通信中,传输的主体是信号,各种电路、设备则是为实施这种传输对信号进行各种处理而设置的。因此,对电路及设备的设计和制造,必然要取决于信号的特性,因而了解信号的特性是十分必要的。图 1-3、图 1-4 和图 1-5 分别表示信息、数据和信号,信号和数据的关系如图 1-6 和图 1-7 所示。

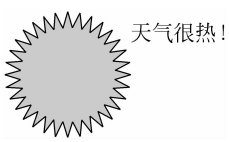

图 1-3 信息

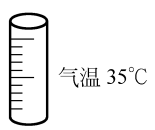

图 1-4 描述信息的数据

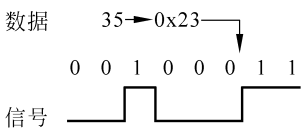

图 1-5 一种表示数据的信号

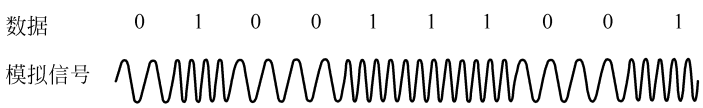

图 1-6 信号和数据的关系——模拟信号

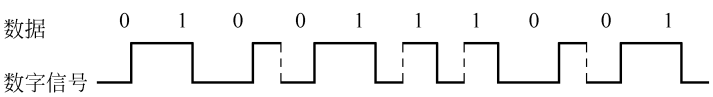

图 1-7 信号和数据的关系——数字信号

下面是信号在数据通信中的几种分类。

(1) 连续信号与离散信号

连续信号与离散信号是确定的时间函数。

如果在某一时间间隔内,对于一切时间值,除了若干不连续点以外都给出确定的函数值,这种信号就称为连续信号。

代表离散信号的时间函数只在某些不连续的瞬时给出函数值。

(2) 随机信号与确定信号

随机信号是指在它实际出现以前,总是有某一种程度不确定性的信号,这种信号不能用单一时间函数表达。由于随机信号的不规则性,对这类信号的分析,要从概率和统计着手。这种信号的一个例子是,信号在传输媒质中受干扰和噪声的作用,使得接收机的输入信号时断时通。随机信号的一般特性包括平均值、最大值与最小值、均方值、平均功率值以及平均频谱等,每一项数值都能描述出随机信号的一部分内在性质。对信号的处理有时从时域转换到频域会更方便。

除了实验室产生的有规律信号外,一般的信号都是随机的。因为对于接收者来说,信号如果是完全确定的时间函数,就不可能由它得到任何新的信息,因而也就失去了通信的目的。尽管确定信号是一种理论上的抽象,它却和随机信号的特性之间有一定联系。利用确定信号来分析系统,能使问题大为简化,在工程上有实际应用意义。

(3) 周期信号与非周期信号

用确定的时间函数表示的信号,又可分为周期信号与非周期信号。严格数学意义的周期信号,是无始无终地重复着某一变化规律的信号。显然,这样的信号实际上是不存在的。所以,周期信号只是指在一定时间内按照某一规律重复变化的信号。

1.1.2 码元和比特(Symbol and Bit)

信号怎么表示数据?其方法是进行编码。

信号的表现形式是码元,进行编码后成为比特数据。比特和码元之间的关系如图 1-8 所示。

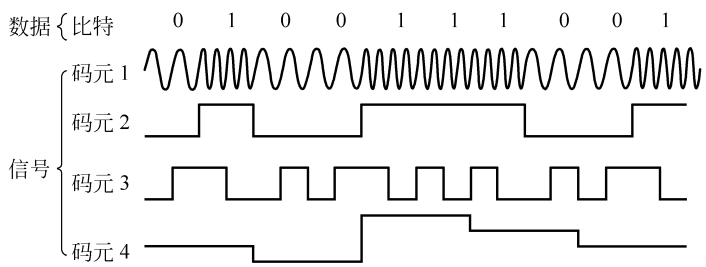

图 1-8 比特和码元的关系——数字信号

1. 码元(symbol)

码元是承载信息量的基本信号单位。

在使用时间域(时域)的波形表示数字信号时,代表不同离散数值的基本波形,是通信网络中表示信号变化的最小单位。

对于正弦波形的模拟信号，码元的数学表达式为

$$f(x) = A\sin(xt + \theta) \tag{1-1}$$

式中，x 为数字，t 为时间，A 为信号幅值，θ 为正弦波形相位。本例中，x 为不同的两种频率，代表两种数字，如图 1-8 中的码元 1。

对于脉冲波形的数字信号，码元的数学表达式为

$$(y_1 \sim y_m) = (x_1 \sim x_n) \tag{1-2}$$

如图 1-8 中的码元 2 可以表示为

$$y = x, \quad m = n = 1 \tag{1-3}$$

码元 3 可以表示为

$$y = (x_1, x_2), \quad m = 1, n = 2 \tag{1-4}$$

码元 4 可以表示为

$$(y_1, y_2) = x, \quad m = 2, n = 1 \tag{1-5}$$

式中 y 为比特数据，取值为(0,1)。m/n 为对应的比特数量/码元数量，m 和 n 取值均为 2 的幂次方。x 为码元信号，取值为$(0, 2^m - 1)$，x 可以为不同的电平值序号，比如 0V、2V、4V 和 6V 等，代表数字 0、1、2 和 3，此时 $m=2, n=1$。

2. 比特(bit)

数字通信中，经过对信号的码元编码后表示成一位二进制数字，称为比特。比特是数据，而码元是信号。比特的数学表达式 $f(x)$ 为

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 为高电平或高频} \\ 0, & x \text{ 为低电平或低频} \end{cases} \tag{1-6}$$

x 为码元的值，信号周期称为比特长度。1 个码元可以携带 n 个比特的信息量，也可以 m 个码元携带 1 个比特的信息量。

作为数字网络，编码后的数据表示为一串比特流。但直接使用比特串流会有许多问题：

(1) 比特串流就像计算机上的机器码一样，难以辨识。

(2) 接收端收到比特串流后，怎么判断比特串流的每一位是正确的？怎么检测错误？

(3) 比特串流在传输过程中丢失了怎么办？怎么检测和通知？

(4) 发送端的速度快，接收端来不及接收或处理怎么办？

还有其他一些问题，需要一种机制来解决，一种方法是将比特串流分组，组成帧(frame)。

1.1.3 帧、数据报、报文段和报文(Frame, Datagram, Segment and Message)

把比特先组装成字节，再将多个字节组成帧，网络传输时将以单个帧为传输单位。

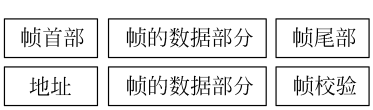

图 1-9 帧的结构

在物理层提供的可能存在差错的比特流传输基础上，增加适当的控制功能，就可以使通信变得比较可靠。

例如，一个帧的结构如图 1-9 所示。

一般帧的数学表达式为

$$f(x) = \{\text{同步字段, 首部字段, 地址字段, 数据字段, 校验字段, 尾部字段}\} \tag{1-7}$$

而每一字段都是比特的集合。对帧的控制有如下功能：

(1) 帧定界和帧同步。链路层的数据传输单元是帧,协议不同,帧的长短和界面也有差别,但无论如何必须对帧进行定界。

(2) 顺序控制,指对帧的收发顺序控制。

(3) 差错检测、恢复和流量控制等。

帧适合于网络内部传输,当需要在网络之间互联时,因为帧并不携带有关网络的信息,所以还需要能够解决网络之间传输和路由的协议数据单元,这就是数据报。

一般数据报的数学表达式为

$$f(x) = \{\text{首部字段,数据字段,报文校验字段,尾部字段}\} \tag{1-8}$$

数据报一般用于网络层,网络层属于网络体系结构中的较高层次,从命名可以看出,网络层解决的是网络与网络之间,即网际通信问题,而不是同一网段内部的问题。网络层的主要功能是提供路由,即选择到达目标主机的最佳路径,并沿该路径传送数据包。

在网络上可以直接传递报文,但实际使用时不同用户的报文长短不一,同一用户的不同报文也长短不一。为了提高传输效率,用户的信息(报文)在现代交换技术(分组交换)中,还要分成一个个大小不等或相等的"报文分组",称为报文段,这样更有利于网络传输。

一般报文段的数学表达式为

$$f(x) = \{\text{首部字段,端口信息字段,数据字段,报文校验字段,尾部字段}\} \tag{1-9}$$

每个报文分组的数据量多少不一样,有的报文还要求如果一个分组内的数据量不够则用无关数据补足。即分组交换的前提是,先对报文进行分组,有时还要求达到一定的分组长度。

报文就是用户从网络上直接接触的信息,比如,用户收发一封邮件,就是一个典型的报文;一次上网浏览一个网页也可以看作一个报文。

一次通信所要传输的所有数据是一个报文,不论长短,都是指其整体。

一般报文段的数学表达式为

$$f(x) = \{\text{首部字段,数据字段,报文校验字段,尾部字段}\} \tag{1-10}$$

在网络系统中一个报文是通信内容加上源地址(信源地址)、目的地址(信宿地址)和控制信息,按照相应规定要求的格式打成一个分组或"包"。

所以报文就像一个包裹,连封皮带内容就是一个"包",更像一封信,包括信封等,是一个完整的信息单位。

综上所述,网络中的信息传输单元在不同的网络层次有不同的名称,其组成和功能不同,分别有着各自的特点,组成了各种计算机网络,如图 1-10 所示。在以下的章节中将以这些信息传输单元为单位,逐步剖析展开网络的组成原理。

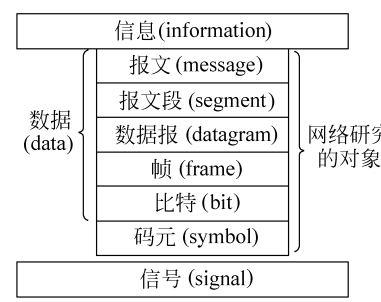

图 1-10 不同网络层次的信息传输单元

1.1.4 信道、信源与信宿(Information Channel, Source and Destination)

通信网络上的信息具有发出、传输和接收过程,每个过程都有专门的名词:信源、信道和信宿。

(1) 信源是产生消息的源。

(2) 信道是信息传输和存储的媒介。

(3) 信宿是消息的接收者。

编码器是将信息变成适合于信道传送的信号设备,译码器是编码的逆变换,分为信源译码和信道译码。信源编码器,可以提高传输效率;信道编码器,可以提高传输可靠性。信息系统传输模型如图 1-11 所示。

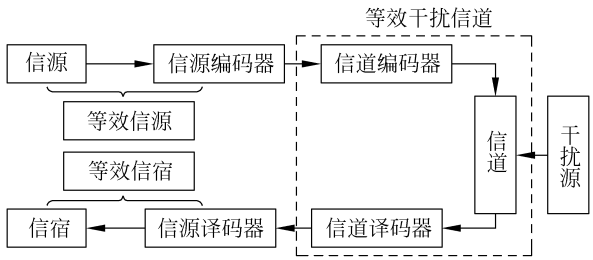

图 1-11　信息传输系统模型

1.2　网络和协议(Network and Protocol)

1.2.1　网络定义(Definition of Network)

计算机网络的简单定义是:一些互连的、自治的计算机集合(图 1-12(b))。互连是指计算机之间有通信信道相连,并且相互之间能够交换信息。自治是指计算机之间没有主从关系,所有计算机都是平等独立的,因此以单计算机为中心的联机系统不是计算机网络(图 1-12(a))。

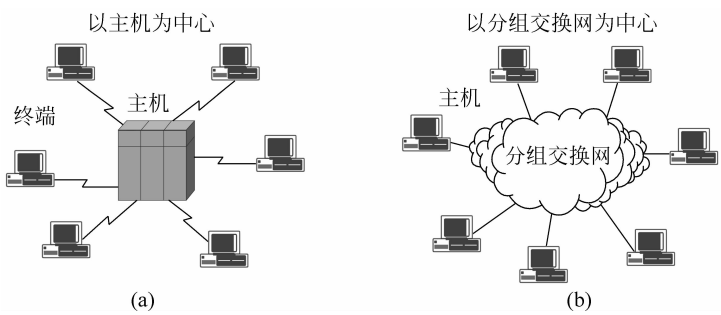

图 1-12　以主机为中心的大型机和以分组交换为中心的计算机网络

一个计算机网络有以下三个主要组成部分:

(1) 若干主机,它们向各用户提供服务。

(2) 一个通信子网,它由一些专用通信处理机(即通信子网中的节点交换机)和连接这些节点的通信链路所组成。

(3) 一系列协议,这些协议是为在主机和主机之间或主机和子网之间或子网中各节点之间的通信所设计的。协议是通信双方事先约定好且必须遵守的规则。

早期的数据通信与现代的计算机通信显然是有区别的。随着技术的进步,数据通信的含义也在发生变化,有时认为计算机通信与数据通信是可以混用的名词。不过在许多情况

下,数据通信网往往指的是计算机网络中的通信子网,也就是在分层的网络体系结构中比较低层的部分。

计算机网络与分布式计算机系统虽然有相同之处,但二者并不等同。分布式系统的最主要特点是整个系统中的各计算机对用户都是透明的,也就是对用户来说,这种分布式计算机系统就好像一台计算机一样。用户通过输入命令就可以运行程序,但并不知道是哪一台计算机在运行程序。由此可见,计算机网络并不等同于分布式计算机系统。一般来说,分布式系统是计算机网络的一个特例。当然,也有一些分布式系统根本就不是计算机网络,例如分布式计算机。

1.2.2 网络协议(Protocol)

一个计算机网络有许多互相连接的节点,在这些节点之间要不断地进行数据和网络控制信息的交换。要做到有条不紊地交换数据,每个节点就必须遵守一些事先约定的规则,这些规则明确规定了所交换数据的格式以及有关的同步问题。这些为进行网络中的数据交换而建立的规则、标准或约定即网络协议。

协议的概念与人与人之间交流的比较如图 1-13 所示。

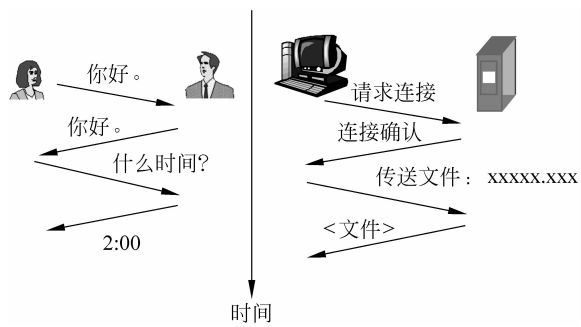

图 1-13 人与人之间的交流和通信协议的对比

1. 协议组成要素

一个网络协议主要由以下三个要素组成:①语法,即数据与控制信息的结构或格式;②语义,即需要发出何种控制信息,完成何种动作以及做出何种应答;③同步,即事件实现顺序的说明。

2. 协议分层

对于非常复杂的计算机网络协议,最好采用层次结构,如图 1-14。分层带来的好处是:每一层实现一种相对独立的功能,因而可将一个难以处理的复杂问题分解为若干个比较容易处理的小问题。

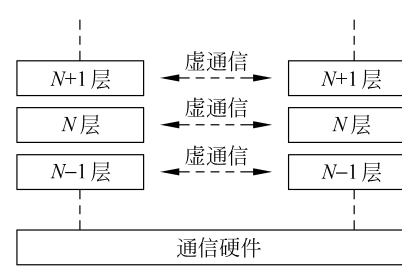

图 1-14 协议的分层

(1) 各层之间是独立的。某一层并不需要知道它的下一层是如何实现的,而仅仅需要知道该层通过层间接口(即界面)所提供的服务。

(2) 灵活性好。当任何一层发生变化时(例如由于技术的变化),只要接口关系保持不变,则在这层以

上或以下的各层均不受影响。此外，某一层提供的服务还可以修改，当某层提供的服务不再需要时，甚至可以将这层取消。

(3) 结构可分割。各层都可以采用最合适的技术来实现。

(4) 易于实现和维护。这种结构使得实现和调试一个庞大而又复杂的系统变得容易，因为整个系统已被分解为若干个易于处理而范围更小的部分了。

(5) 促进标准化工作。这主要是由于每一层的功能和所提供的服务都已有了精确的说明。

1.2.3 协议数据单元(Protocol Data Unit)

在网络协议中，信息传递的单位(即各种数据单元)可分为三种，即：协议数据单元(protocol data unit，PDU)、接口数据单元(interface data unit，IDU)和服务数据单元(service data unit，SDU)。

协议数据单元就是在不同站点的各层对等实体之间，为实现该层协议所交换的信息单元。考虑到协议的要求，如时延、效率等因素，对协议数据单元的大小一般有一定的要求。通常将第 N 层的协议数据单元记为(N)PDU。(N)PDU 由两部分组成，即：

(1) 本层的用户数据，记为(N)UD(user data)；

(2) 本层的协议控制信息，记为(N)PCI(protocol control information)。

$$(N)\text{PDU} = \{(N)\text{PCI}, (N)\text{UD}\} \tag{1-11}$$

(N)PCI 一般作为首部加在(N)UD 前面，但有时也可作为尾部加在(N)UD 后面。为了将(N)PDU 传送到对等实体，必须将(N)PDU 通过($N-1$)服务访问点交给($N-1$)实体。这时，($N-1$)实体就把整个(N)PDU 当作($N-1$)UD，再加上($N-1$)层的 PCI，就组成了($N-1$)层的协议数据单元，即($N-1$)PDU。

$$(N-1)\text{UD} = (N)\text{PDU} \tag{1-12}$$

有时，在某一层中的一个协议数据单元只作控制信息之用。这时，在该协议数据单元中就只有该层的 PCI 而没有用户数据这一项了。

1.3 OSI 网络体系结构(OSI Architecture)

将计算机网络的各层及其协议的集合称为网络的体系结构，就是计算机网络及其部件所应完成的功能。这些功能究竟是用何种硬件或软件完成的，则是一个遵循这种体系结构的实现问题。体系结构是抽象的，而实现则是具体的，是真正在运行的计算机硬件和软件。

世界上第一个网络体系结构是 IBM 公司于 1971 年提出的，它取名为系统网络体系结构(system network architecture，SNA)。凡是遵循 SNA 的设备就称为 SNA 设备，这些 SNA 设备可以很方便地进行互连。在此之后，许多公司也纷纷建立自己的网络体系结构。这些体系结构大同小异，都采用了层次技术，但各有特点以适合本公司生产的计算机组成网络。计算机网络体系结构的出现，促进了计算机网络的发展。

著名的网络体系结构是 OSI 和 TCP/IP。OSI 可以作为学习、研究的理论参照模型，而 TCP/IP 则是实际应用最为广泛的体系结构，如用于 Internet 中。

1.3.1 OSI参考模型的制定(Design OSI Reference Model)

具有一定体系结构的各种计算机网络在20世纪70年代中期已经获得了相当规模的发展。但是,一个公司的计算机却很难和另一个公司的计算机互相通信,因为它们的网络体系结构不一样。然而要更加充分地发挥计算机网络的效益,就应当使不同厂家生产的计算机能够互相通信。十分明显,这就需要制定一个网络互联的国际标准。

国际标准化组织(International Standard Organization,ISO)于1978年发布了一个使各种计算机能够互联的标准框架——开放式系统互联参考模型(open system interconnection/reference model,OSI/RM),简称OSI。所谓开放,就是指任何不同的计算机系统,只要遵循OSI标准,就可以和同样遵循这一标准的任何计算机系统通信。这是一个计算机互联的国际标准,它描述了网络硬件和软件是如何在一种分层模式下协同工作来完成通信的,但在实际的互联网络中并没有严格遵守这一标准。

OSI参考模型把网络通信分成7层,每一层覆盖了不同的网络活动、设备和协议,如表1-1所示。OSI每一层均提供某种服务或操作,为把数据通过网络发布给另外一台计算机。最低两层定义了网络的物理介质和一些相关任务,例如把数据位放置到网卡和电缆上等;最高的几层定义应用程序访问通信服务的方式。层与层之间彼此是通过接口分隔的。

表1-1 OSI参考模型

7. 应用层	application layer	3. 网络层	network layer
6. 表示层	presentation layer	2. 数据链路层	data link layer
5. 会话层	session layer	1. 物理层	physical layer
4. 传输层	transport layer		

OSI实际上并非实用型网络协议,仅仅是划分了网络层次的一种参考模型,为设计真正实用的网络协议提供了指导,简化了协议设计,方便了网络互联。此外,通信设备也是分层次的,例如后面介绍的集线器、网桥、路由器与网关,就分别属于物理层、数据链路层、网络层与应用层,它们各自使用相应层次的网络协议。

分层的主要原则如下:

(1) 当需要有一个不同等级的抽象时,就应当有一个相应的层次。

(2) 每一层的功能应当是非常明确的。

(3) 层与层的边界应选择得使通过这些边界的信息量尽可能少,否则层与层之间的信息传递会不方便。

(4) 层数太少,会使每一层的协议太复杂。但层数太多,又会在描述和综合各层功能的系统工程任务时遇到较多困难。

1.3.2 OSI各层的主要功能(Functions of all OSI Layers)

网络体系结构分层数量需要权衡功能划分和协议复杂性,在OSI参考模型中采用了7个层次的体系结构,以下是各层的主要功能。

为了更深刻地理解ISO/OSI参考模型,表1-2给出了两个主机用户A与B对应各层之间的通信联系的简单含义。

表 1-2　主机间通信及各层操作的简单含义

主　　机	对等层协议规定的通信联系	数据单位
应用层	用户进程之间的用户信息交换	用户数据
表示层	用户数据编辑、交换、扩展、加密、压缩或重组为会话信息	会话报文
会话层	建议和撤出会话，如会话失败应有秩序地恢复或关闭	会话报文
传输层	会话信息经过传输系统发送，保持会话信息的完整	报文段
网络层	通过逻辑链路发送报文组，会话信息可以分为几个分组发送	数据报
数据链路层	在物理链路上发送帧及应答	帧
物理层	建立物理线路，以便在线路上发送位串	比特

第一层：物理层(physical layer)

该层规定通信设备的机械的、电气的、功能的和规程的特性，用以建立、维护和拆除物理链路连接。具体地讲，机械特性规定了网络连接时所需接插件的规格尺寸、引脚数量和排列情况等；电气特性规定了在物理连接上传输比特流时线路上信号电平的大小、阻抗匹配、传输速率和距离限制等；功能特性是指对各个信号分配确切的信号含义，即定义了通信双方之间各个线路的功能；规程特性定义了利用信号线进行比特流传输的一组操作规程，是指物理连接的建立、维护和交换信息，是双方在各电路上的动作系列。在这一层，数据的单位称为比特或码元。属于物理层定义的典型规范代表包括：EIA/TIA RS-232、EIA/TIA RS-485、RJ-45、10Base-T、100Base-F 和 1000Base-T 等。

第二层：数据链路层(datalink layer)

数据链路层最基本的服务是将源计算机网络层传来的数据可靠地传输到相邻节点的目标计算机的网络层。为达到这一目的，数据链路层必须具备一系列相应的功能，主要有：

如何将数据组合成数据块(帧，帧是数据链路层的传送单位)？

如何控制帧在物理信道上的传输，包括如何处理传输差错？

如何调节发送速率以使之与接收方相匹配？

如何在两个网络实体之间提供数据链路通路的建立、维持和释放管理？

链路层是为网络层提供数据传送服务的，在不可靠的物理介质上提供可靠的传输。该层的作用包括：物理地址寻址、数据成帧、流量控制、数据的检错、重发等。在这一层，数据的单位称为帧。数据链路层协议的代表包括：HDLC、PPP、CSMA/CD、Modbus 和 CAN 等。

第三层：网络层(network layer)

在计算机网络中进行通信的两个计算机之间可能会经过很多个数据链路，也可能还要经过很多通信子网。网络层的任务就是选择合适的网间路由和交换节点，确保数据及时传送。网络层将数据链路层提供的帧组成数据包，包中封装有网络层包头，其中含有逻辑地址信息：源站点和目的站点地址的网络地址。如果谈论一个 IP 地址，那么是在处理第三层网络的问题，这是“数据报”问题，而不是第二层网络的“帧”。IP 是第三层网络的一部分，有关路由的一切事情都在这第三层网络处理，地址解析和路由是第三层网络的重要目的。网络层还可以实现拥塞控制、网际互连等功能。在这一层，数据的单位称为数据报(datagram)，网络层协议的代表包括：IP、ARP、ICMP、IGMP、RIP 和 OSPF 等，这一层最重要的协议是 IP 协议。

第四层：传输层(transport layer)

第四层即传输层的数据单元也称做数据报(datagrams)、分组(packets)或者段(segments)。例如当谈论具体协议时，TCP 的数据单元称为“段”，而 UDP 协议的数据单元称为“数据报”。该层负责获取信息的可靠传输，因此，它必须跟踪数据单元碎片、乱序到达的数据包和其他在传输过程中可能发生的危险。第四层为上层提供端到端(最终用户到最终用户)的透明的、可靠的数据传输服务。所谓透明的传输是指在通信过程中，传输层对上层屏蔽了通信传输系统的具体细节。传输层协议主要为 TCP 和 UDP，重点是 TCP 协议。

第五层：会话层(session layer)

会话层也可以称为会晤层或对话层，在会话层及以上的高层次中，数据传送的单位不再另外命名，而是统称为报文(message)。会话层不参与具体的传输，它提供包括访问验证和会话管理在内的建立和维护应用之间通信的机制。如服务器验证用户登录便是由会话层完成的。在实际网络中，这一层一般未得到实现。

第六层：表示层(presentation layer)

表示层主要解决用户信息的语法表示问题。它将欲交换的数据从适合于某一用户的抽象语法，转换为适合于 OSI 系统内部使用的传送语法，即提供格式化的表示和转换数据服务。在实际网络中，数据的压缩和解压缩、加密和解密等工作都由表示层负责，可以认为网络安全的主要功能是在这一层实现。

第七层：应用层(application layer)

应用层为操作系统或网络应用程序提供访问网络服务的接口，应用层协议的代表包括：Telnet、FTP、HTTP、SNMP 和 SMTP 等。

可以把以上所述的各层的最主要的功能归纳如下：

应用层——与用户应用进程的接口，即相当于：做什么？

表示层——数据格式的转换，即相当于：对方看起来像什么？

会话层——会话的管理与数据传输的同步，即相当于：轮到谁讲话和从何处讲？

传输层——从端到端经网络透明地传送报文，即相当于：对方在何处？

网络层——分组传送和路由选择，即相当于：走哪条路可到达该处？

链路层——在链路上无差错地传送帧，即相当于：每一步应该怎样走？

物理层——将比特流送到物理媒体上传送，即相当于：对上一层的每一步应怎样利用物理媒体。

为方便起见，常把这 7 个层次分为低层与高层，低层为 1～4 层，是面向通信的；高层为 5～7 层，是面向信息处理的。

1.4 TCP/IP 网络体系结构(TCP/IP Architecture)

OSI 虽然是国际标准，但由于分层过细和过于复杂，在实际网络中并没有得到普及应用，而作为商业网络协议推出的 TCP/IP 协议反而大行其道，成了互联网的互联通信标准。

OSI 模型最基本的技术就是分层，TCP/IP 也采用分层体系结构，每一层提供特定的功能，层与层间相对独立，因此改变某一层的功能不会影响其他层。这种分层技术简化了系统的设计和实现，提高了系统的可靠性及灵活性。

TCP/IP 共分四层，即网络接口层、网络互联层、传输层和应用层。每一层提供特定功能，层与层之间相对独立，与 OSI 七层模型相比，TCP/IP 没有表示层和会话层，这两层的功能由应用层提供，OSI 的物理层和数据链路层功能由网络接口层完成。TCP/IP 参考模型及协议簇如图 1-15 所示，TCP/IP 与 OSI 参考模型的比较如表 1-3 所示。

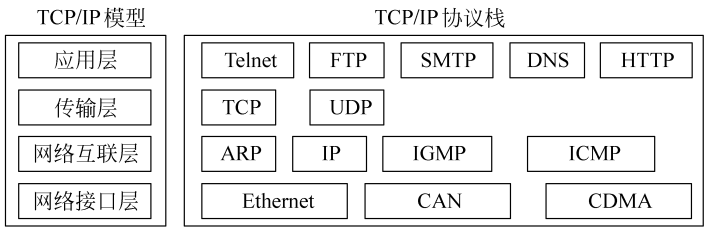

图 1-15　TCP/IP 参考模型

表 1-3　网络参考模型比较

TCP/IP 网络	OSI 网络
应用层	应用层
	表示层
	会话层
传输层	传输层
网络层	网络层
数据链路层	数据链路层
物理层	物理层

1. 网络接口层

网络接口层是 TCP/IP 参考模型的最低层，它负责通过网络发送和接收 IP 数据报，相当于 OSI 参考模型中的物理层（第一层）和数据链路层（第二层）。TCP/IP 参考模型允许主机连入网络时使用多种现成的与流行的协议，例如局域网协议或其他一些协议。网络接口层是 ICP/IP 协议的最底层，负责网络层与硬件设备间的联系。这一层的协议非常多，包括各种逻辑链路控制和媒体访问。任何用于 IP 数据报交换的分组传输协议均可包含在这一层中。

2. 网络互联层

网络互联层是 TCP/IP 参考模型的第二层，相当于 OSI 参考模型的网络层的无连接网络服务。网络互联层负责将源主机的报文分组发送到目的主机，源主机与目的主机可以在同一个网上，也可以在不同的网上。网络层解决的是计算机到计算机间的通信问题，它包括以下三方面的功能：

（1）处理来自传输层的分组发送请求，收到请求后将分组装入 IP 数据报，填充报头，选择路径，然后将数据报发往适当的网络接口；

（2）处理数据报；

（3）处理网络控制报文协议，即处理路径、流量控制、阻塞等。

3. 传输层

传输层是 TCP/IP 参考模型的第三层，它负责应用进程之间的“端-端”通信。传输层的主要目的是：在互联网中源主机与目的主机的对等实体间建立用于会话的“端-端”连接。从这一点上看，TCP/IP 参考模型的传输层与 OSI 参考模型的传输层功能是相似的。传输层解决的是计算机程序到计算机程序之间的通信问题，即通常所说的“端到端”通信。传输层对信息流具有调节作用，提供可靠传输，确保数据到达无误。

4. 应用层

应用层是 TCP/IP 参考模型的最高层，它包括所有的高层协议，并且不断有新的协议加入，应用层提供一组常用的应用程序给用户。在应用层，用户调节访问网络的应用程序，应

用程序与传输层协议相配合,发送或接收数据。每个应用程序都有自己的数据形式,它可以是一系列报文或字节流,但不管采用哪种形式,都要将数据传送给传输层以便交换。应用层是一般网络用户直接看到的网络层次。

实际上,TCP/IP 网络体系结构中的网络接口层在 OSI 中分成了数据链路层和物理层,因此,比较公认的网络体系结构是融合了 TCP/IP 和 OSI,以 TCP/IP 为主,即分为 5 层的网络协议结构:物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。目前的互联网技术就是基于 TCP/IP 协议的。

1.5 现场总线网络(Field Bus)

1.5.1 总线定义及分类(Bus Definition and Classes)

1. 定义

总线(bus)是一种描述电子信号传输线路的结构形式,是一类信号线的集合,是子系统间传输信息的公共通道。通过总线能实现整个系统内各部件之间的信息进行传输、交换、共享和逻辑控制等功能。如在计算机系统中,它是 CPU、内存、输入/输出设备传递信息的公用通道,主机的各个部件通过总线相连接,外部设备通过相应的接口电路再与总线相连接。

2. 分类

总线分类方式有很多,如总线可分为外部和内部总线、系统总线和数据控制总线等,下面介绍几种最常用的分类方法。

(1) 按功能分

最常见的是从功能上来对数据总线进行划分,可以分为地址总线、数据总线和控制总线。在有的系统中,数据总线和地址总线可以在地址锁存器控制下被共享,即复用。

地址总线是专门用来传送地址的。在设计过程中,用得最多的应该是从 CPU 地址总线来选用外部存储器的存储地址。地址总线的位数往往决定了存储器存储空间的大小,比如地址总线为 16 位,则其最大可存储空间为 2^{16}(64KB)。

数据总线用于传送数据信息,有单向传输和双向传输数据总线之分,双向传输数据总线通常采用双向三态形式的总线。数据总线的位数通常与微处理的字长相一致,例如 Intel 8086 微处理器字长 16 位,其数据总线宽度也是 16 位。在实际工作中,数据总线上传送的并不一定是完全意义上的数据。

控制总线用于传送控制信号和时序信号。如微处理器对外部存储器进行操作时要先通过控制总线发出读/写信号、片选信号和读入中断响应信号等。控制总线一般是双向的,其传送方向由具体控制信号而定,其位数根据系统的实际控制需要而定。

(2) 按传输方式分

按照数据传输的方式划分,总线可分为串行总线和并行总线。从原理来看,并行传输方式优于串行传输方式,但其成本会有所增加。通俗地讲,并行传输的通路犹如一条多车道公路,而串行传输则像只允许一辆汽车通过单线公路。目前常见的串行总线有 SPI、I2C、USB、IEEE1394、RS-232、RS-485 和 CAN 等;而并行总线相对来说种类要少,常见的如 IEEE1284、ISA、PCI 等。

(3) 按时钟信号方式分

按照时钟信号是否独立,可以分为同步总线和异步总线。同步总线的时钟信号独立于数据,也就是说要用一根单独的线来作为时钟信号线;而异步总线的时钟信号是从数据中提取出来的,通常利用数据信号的边沿来作为时钟同步信号。

1.5.2 现场总线定义和分类(Definition and Classes of Field Bus)

随着控制、计算机、通信、网络等技术的发展,信息交换沟通的领域正在迅速覆盖从工厂的现场设备层到控制、管理的各个层次,覆盖从工段、车间、工厂、企业乃至世界各地的市场,形成了分布式控制系统(distributed control system,DCS)。

信息技术的飞速发展,引起了自动化系统结构的变革,逐步形成以网络集成自动化系统为基础的企业信息系统。现场总线就是顺应这一形势发展起来的新技术。

现场总线是应用在生产现场,在微型计算机化测量控制设备之间实现双向串行多节点数字通信的系统,也称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络,它在制造业、交通、楼宇等方面的自动化系统中具有广泛的应用背景。

现场总线的一种定义是连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络,形成现场总线控制系统(fieldbus control system,FCS)。

现场总线技术将专用微处理器置入传统的测量控制仪表,使它们各自具有数字计算和通信能力,采用可进行简单连接的双绞线等作为总线,把多个测量控制仪表连接成网络系统,并按公开、规范的通信协议,在位于现场的多个微型计算机化测量控制设备之间以及现场仪表与远程监控计算机之间,实现数据传输与信息交换,形成各种适应实际需要的自动控制系统。简而言之,它把单个分散的测量控制设备变成网络节点,以现场总线为纽带,连接成可以相互沟通信息、共同完成自控任务的网络系统与控制系统。它给自动化领域带来的变化正如众多分散的计算机被网络连接在一起,使计算机的功能加入到信息网络的行列。图 1-16 是用于汽车自动控制的一种现场总线结构。

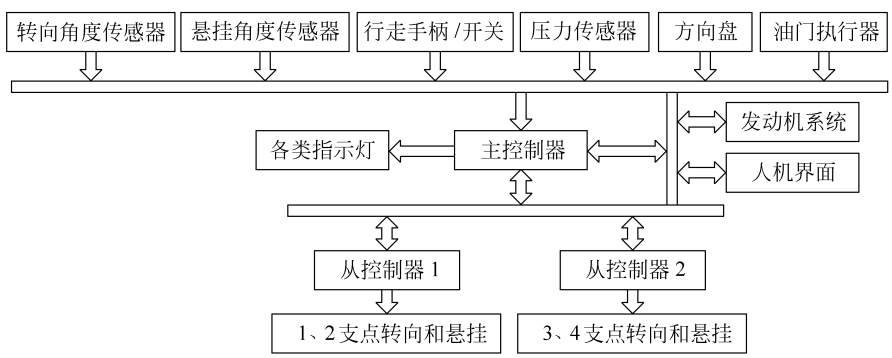

图 1-16 典型的现场总线应用于汽车电子

较流行的现场总线产品有:RS-485、CAN(Controller Area Network)、LonWorks(Local Operation Network)、Profibus(Profess FieldBus)、DeviceNet 和 ControlNet 等,它们都在不同的工业现场获得了应用,对现场总线技术的发展和促进发挥了重要的作用。由于工业自动化现场的环境和需求千差万别,使得现场总线未能统一成为一种公认的国际标

准。因此现场总线可以说是处于百花齐放的研究应用局面,本书只列举几种常用的现场总线。

现场总线可以有不同的分类方法,下面是几种典型的现场总线。

1. RS-485

RS-485 作为现场总线的鼻祖,还有许多设备继续沿用这种通信协议,它是在 RS-232 的基础上进行了差分改进,将 RS-232 的点到点结构改造成了多点总线结构,在传输速率、传输距离和可靠性上较 RS-232 都有了较大的提高。采用 RS-485 通信具有设备简单、低成本等优势,在工业现场总线控制网络中仍有一定的生命力。

2. CAN

CAN 是控制网络(control area network)的简称,最初用于汽车内部测量与执行部件之间的数据通信,其总线规范已被 ISO 国际标准组织制订为国际标准,现已广泛应用于各种工业离散控制领域。

CAN 协议也是建立在国际标准组织的开放系统互连模型基础上的,不过其模型结构只有 3 层,取 OSI 底层的物理层、链路层和最上层的应用层。其信号传输介质为双绞线,通信速率最高可达 1Mbps/40m,直接传输距离最远可达 10km/5kbps,可挂接设备最多可达 110 个。

CAN 的信号传输采用短帧结构,每一帧的有效字节数最多为 8 个,因而传输时间短,受干扰概率低,短帧也是现场总线普遍采用的结构。当节点严重错误时,具有自动关闭的功能以切断该节点与总线的联系,使总线上的其他节点及其通信不受影响,具有较强的抗干扰能力。

CAN 支持多主方式工作,网络上任何节点均在任意时刻主动向其他节点发送信息,支持点对点、一点对多点和全局广播方式接收/发送数据。它采用总线仲裁技术,当出现几个节点同时在网络上传输信息时,优先级高的节点可继续传输数据,而优先级低的节点则主动停止发送,从而避免了总线冲突。

3. Profibus

Profibus 遵从 ISO/OSI 参考模型,由 Profibus-DP、Profibus-FMS、Profibus-PA 组成了 Profibus 系列。DP 型用于分散外设间的高速传输,适合于加工自动化领域的应用;FMS 意为现场信息规范,适用于纺织、楼宇自动化、可编程控制器、低压开关等一般自动化;而 PA 型则是用于过程自动化的总线类型,它遵从 IEC1158-2 标准。

Porfibus 支持主从系统、纯主站系统、多主多从混合系统等几种传输方式,以适应不同的工业现场控制需要。主站具有对总线的控制权,可主动发送信息。对多主站系统来说,主站之间采用令牌方式传递信息,得到令牌的站点可在一个事先规定的时间内拥有总线控制权,事先规定好的令牌在各主站中拥有循环一周的最长时间。按 Profibus 通信规范,令牌在主站之间按地址编号顺序,沿上行方向进行传递。主站在得到控制权时,可以按主/从方式,向从站发送或索取信息,实现点对点通信。主站可采取对所有站点广播(不要求应答),或有选择地向一组站点广播。

Profibus 的传输速率为 9.6kbps～12Mbps,最大传输距离在 9.6～187.5kbps 时为 1000m,500kbps 时为 400m,1500kbps 时为 200m,3000～12000kbps 时为 100m,可用中继器延长至 10km。其传输介质可以是双绞线,也可以是光缆,最多可挂接 127 个站点,这在

一般的工业控制现场是够用的。

4. 基金会现场总线

基金会现场总线，即 foundation field bus，简称 FF，这是在过程自动化领域得到广泛支持和具有良好发展前景的技术。它以 ISO/OSI 开放系统互连模型为基础，取其物理层、数据链路层、应用层为 FF 通信模型的相应层次，并在应用层上增加了用户层。层数的减少有利于提高现场总线的效率。

基金会现场总线分低速 H1 和高速 H2 两种通信速率。H1 的传输速率为 31.25kbps，通信距离可达 1900m（可加中继器延长），支持总线供电，支持本质安全防爆环境。H2 的传输速率为 1Mbps 和 2.5Mbps 两种，其通信距离为 750m 和 500m。物理传输介质可支持双绞线、光缆和无线信号，协议符合 IEC1158-2 标准。

1.5.3 现场总线的功能和体系结构（Function and Architecture of Field Bus）

现场总线的实质含义表现在以下 6 个方面。

（1）现场通信网络

用于过程以及制造自动化的现场设备或现场仪表互联的通信网络。

（2）现场设备互联

现场设备或现场仪表是指传感器、变速器和执行器等，这些设备通过传输线路互连，传输线可以使用双绞线、同轴电缆、光纤和电源线等，可根据需要因地制宜地选择不同类型的传输介质。

（3）互操作性

现场设备或现场仪表种类繁多，没有任何一家制造商可以提供一个工厂所需要的全部现场设备，所以互相连接不同制造商的产品是不可避免的。用户希望对不同品牌的现场设备统一组态，构成所需的控制回路，这些就是现场总线设备互操作性的含义。现场设备互连是基本的要求，只有实现互操作性，用户才能自由地集成 FCS。

（4）分散功能块

FCS 废弃了 DCS 的输入/输出单元和控制站，把 DCS 控制站的功能块分散地分配给现场仪表，从而构成虚拟控制站。由于功能块分散在多台仪表中，并可统一组态，因而可供用户灵活选用各种功能，构成所需的控制系统，彻底地实现分散控制。

（5）通信线供电

通信线供电方式允许现场仪表直接从通信线上摄取能量，对于要求本质安全环境的低功耗现场仪表，可以采用这种供电方式，与其配套的还有安全栅。

（6）开放式互联网络

现场总线为开放式互联网络，它既可以与同层网络互联，也可与不同层网络互联，实现网络数据库的共享。不同制造商的网络互联十分简便，用户不必在硬件或软件上花太多气力。通过网络对现场设备和功能模块统一组态，把不同厂商的网络及设备融为一体，构成统一的 FCS。

从物理结构来看，现场总线系统有两个主要组成部分：一是现场设备；二是形成系统的传输介质。现场设备由现场 CPU 芯片以及外围电路构成，现场传输介质使用最多的是双绞线。

现场总线网络结构是按照国际标准化组织(ISO)制定的开放系统互联 OSI 参考模型建立的。从 OSI 模式的角度来看,现场总线将 OSI 的 7 层简化为 3 层,分别由 OSI 参考模式的第一层物理层、第二层数据链路层、第七层应用层组成。有的现场总线在应用层之上增加了用户层,因此可以划分为 4 层,即物理层、数据链路层、应用层和用户层。两种网络体系结构的对比见表 1-4。4 个层次的任务概括如下:

表 1-4 两种体系结构

OSI	现场总线
应用层	用户层
表达层	应用层
会话层	
传输层	
网络层	
数据链路层	数据链路层
物理层	物理层

(1) 物理层

物理层规定了传输媒介(铜导线、无线电和光缆 3 种)的传输速率、每条线路可接仪器数量、最大传输距离、电源以及连接方式和信号类型等。

(2) 数据链路层

数据链路层规定了物理层和应用层之间的接口,如数据结构、从总线上存取数据的规则、传输差错识别处理、噪声检测、多主站使用的规范化等。

(3) 应用层

应用层提供设备之间以及网络要求的数据服务,对现场过程控制进行支持,为用户提供一个简单的接口,定义如何读、写、解释和执行一条信息或命令。

(4) 用户层

应用层把数据规范为特定的数据结构,用户层标准功能块由基本功能块如模拟量输入输出、开关量输入输出、PID 控制等组成,各厂商必须采用标准的输入输出和基本参数以保证现场仪表的互操作性。

1.6 网络分类、历史和发展(Networks Classes, History and Future Development)

1.6.1 网络分类(Networks Classes)

1. 交换方式(switching mode)

交换是现代网络的基本特征,可分为 3 种,如图 1-17 所示,分别说明如下:

(1) 电路交换(circuit switching)

电路交换也可称为线路交换。从通信资源的分配方面来看,电路交换是预先分配传输带宽。用户在开始通话之前,先要申请(例如通过拨号)建立一条从发端到收端的物理通路,只有在此物理通路建立之后(即用户占有了一定的传输带宽),双方才能互相通话。在通话的全部时间里,用户始终占用端到端的固定传输带宽。

(2) 报文交换(message switch)

采用存储转发(store-and-forward)的报文,实质上是采用了断续(或动态)分配传输带宽的策略。这对传送突发式的计算机数据是非常合适的,因为这样就可以大大提高通信线路的利用率。

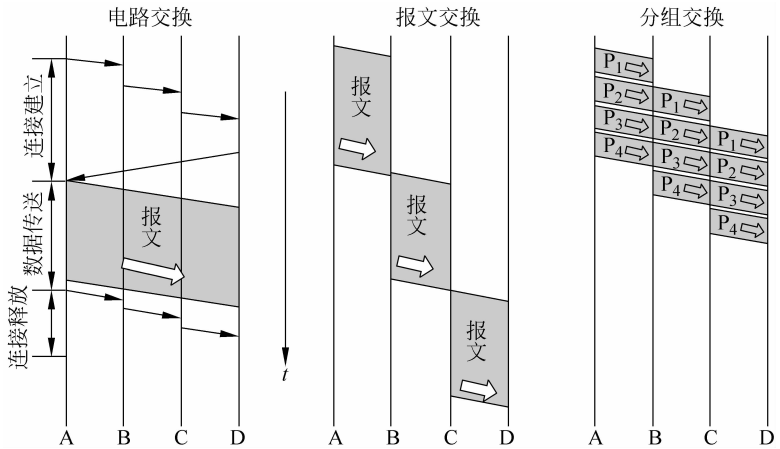

图 1-17　三种交换方式的比较

(3) 分组交换(packet switch)

将较长的报文划分成较短的、固定或不固定长度的数据段,既可以实现存储转发的功能,也有利于报文的检验和传输路线优化,是现在计算机通信网络的主要交换技术,也称做包交换。

以上三种交换方式的比较如图 1-17 所示。

(4) 混合交换(mixed switch)

在一个数据网中同时采用电路交换和分组交换,如对实时性要求高的多媒体通信可以用电路交换来保证性能要求。

2. 网络结构(network structure)

(1) 集中式网络

在一个集中式网络中,所有信息流必须经过中央处理设备(即交换节点)。链路都从中央交换节点向外辐射,这个中心节点的可靠性基本上决定了整个网络的可靠性。集中式网络又称为星型网,有时为增加可靠性可采用双中心节点。若很多个终端集中配置在某处时,可采用集中器或复用器。集中器有存储功能,因而其输入链路容量的总和可超过输出链路的容量,而复用器的输入链路容量的总和则不能超过其输出链路的容量。

(2) 分散式网络

分散式网络是集中式网络的扩展,又称为非集中式网络。其特点是它的某些集中器或复用器具有一定的交换功能,因此网络变为星型网与格状网的混合物。分散式网络的可靠性提高了。

(3) 分布式网络

分布式网络是格状网。也就是说,其中任何一个节点都至少和其他两个节点直接相连,因而分布式网络的可靠性是最高的。现在一些网络常把主干网络做成分布式的,而非主干网络则做成集中式的。

3. 网络地理范围(network geography scope)

(1) 广域网(wide area network,WAN)

作用范围通常为几十到几千千米,广域网有时也称为远程网(long haul network)。

(2) 局域网(local area network,LAN)

一般用微型计算机通过高速通信线路相连(速率一般在10Mb/s以上),但在地理上则局限在较小的范围(几十米至几千米范围内,如1km左右),一般是一幢楼房或一个单位内部。

(3) 城域网(metropolitan area network,MAN)

作用范围是一个城市,城域网的传送速率也在1Mb/s以上,但其作用距离在几千米至几十千米的范围。

(4) 个人区域网(personnel area network,PAN)

一般用于一个家庭内部或一个房间内,几米至十几米的范围。

4. 网络使用对象(using network users)

(1) 公用网(public network)

公用网又称为公用数据通信网,一般是国家的电信部门建造的网络。"公用"的意思就是所有愿意按电信部门规定交纳费用的人都可以使用,公用网也可称为公众网。

(2) 专用网 (private network)

专用网是某个部门或单位为本系统的特殊业务工作需要而建造的网络,这种网络一般不向本系统以外的人提供服务。例如,军队、铁路、电力等系统均有本系统的专用网。它可分为部门网络、企业网络和校园网络等。

5. 网络拓扑结构(network topology structure)

计算机网络的拓扑结构是指抛开网络中的具体设备,把网络中的计算机抽象为点,把两点间的网络连接抽象为线,用相对简单的拓扑图形式画出网络上的计算机连接方式。常见的网络拓扑结构有以下几种。

(1) 总线拓扑结构

总线拓扑结构是以一根电缆作为传输介质(称为总线),在一条总线上装置多个T型头,每个T型头连接一个节点机系统,总线两端用端接器防止信号反射,如图1-18所示。节点之间按广播方式进行通信,一个节点发送的信息其他节点均可接收。

总线拓扑结构的优点是结构简单,节点增减方便,连线总长度小于星型结构。缺点是总线任何一处出现故障,都可能引起整个网络的瘫痪。

(2) 星型拓扑结构

星型拓扑结构是以一台设备作为中央节点,其他外围节点都单独连接在中央节点上,如图1-19所示。各外围节点之间不能直接通信,必须通过中央节点进行通信。

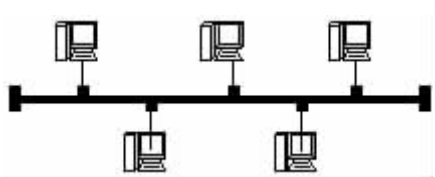

图1-18 总线拓扑结构

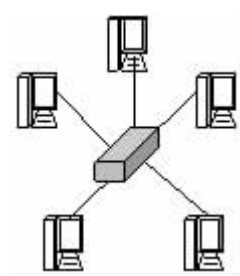

图1-19 星型拓扑结构

星型拓扑结构的优点是结构简单，任何一个连接只涉及中央节点和一个站点；站点故障容易检测和隔离，单个站点故障只影响一个设备，不会影响全网。缺点是网络性能依赖于中央节点，一旦中央节点出现故障，就会危及全网，故对中央节点机要求高；每个站点都需要有一个专用线路，连线费用大，利用率低；当网络需要扩展时，必须增加到中央节点的连线，因而网络扩展较困难。

(3) 环型拓扑结构

环型拓扑结构是把各个相邻节点相互连接起来以构成环状，如图 1-20 所示。各节点通过中继器连接到闭环上，对于任意两个节点之间的数据传送，其信息是单向、沿环、逐点通过转发传送到下一站点，并最终到达目标站点。

环型拓扑结构的优点是传输速率高，传输距离远；环路中各节点的地位和作用是相同的，因此容易实现分布式控制；在环型拓扑结构的网络中，传输信息的时间是固定的，从而便于实时控制。缺点是一个站点的故障会引起整个网络的崩溃，另外节点的增加和删除也比较复杂。可以采用双环来提高网络的可靠性。

(4) 树型拓扑结构

树型拓扑结构是一种分级结构，节点按层次进行连接，如图 1-21 所示。在树型拓扑结构中，信息交换主要在上下节点之间进行，同层节点之间一般不进行数据交换。树型结构的优点是通信线路连接简单，网络管理软件也不复杂，维护方便。缺点是资源共享能力差，可靠性低，任何一个工作站或链路的故障都可能影响所在网络分支的运行。

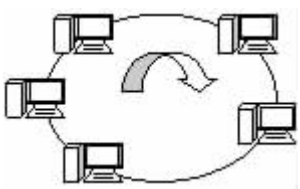

图 1-20　环型拓扑结构

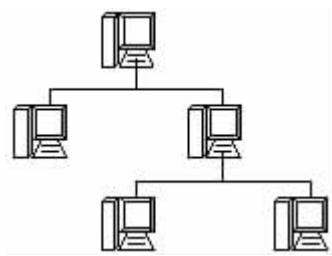

图 1-21　树型拓扑结构

在实际应用中一般将多种拓扑结构连在一起而形成混合拓扑结构，其具有不同拓扑结构的特点，例如主干网采用环型、局域网采用星型等。

一般而言，网络拓扑结构会影响网络传输介质的选择和控制方法的确定，因而会影响网上节点的运行速度和网络软、硬件接口的复杂度。网络的拓扑结构和介质访问控制方法是影响网络性能的最重要因素，因此应根据实际情况，选择最适合的拓扑结构，确保组建的网络具有较高的性能。

1.6.2　分组交换的产生(Packet Switching)

计算机网络是 20 世纪 60 年代美国和苏联冷战时期的产物。20 世纪 60 年代初，美国国防部领导的远景研究规划局(Advanced Research Project Agency，ARPA) 提出要研制一种生存性(survivability)很强的网络，就采用了分组交换网络技术。

传统的电路交换(circuit switching)的电信网有一个缺点：正在通信的电路中只要有一个交换机或一条链路被破坏，整个通信电路就会中断，如要改用其他迂回电路，必须重新拨