



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数据通信技术

伍振国 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数据通信技术

主 编 伍振国
副主编 张金生 聂立文
主 审 赵丽花 范新龙

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共 10 章,主要对数据通信的数据传输、数据交换、数据传输差错控制、数据通信网络的体系结构等基本知识进行了介绍,对局域网组成和设备、城域网组成和设备、广域网的组成和 VPN 原理、接入网技术、因特网应用协议做了分析。本书突出当前正在使用的数据通信主流技术,淡化已经陈旧的数据通信技术。书中编写了较多的实训操作案例,是理论教学、实作训练相结合的教材。

本书可作为高职院校通信专业、计算机专业、轨道交通控制专业、铁道通信信号专业、电子信息专业的数据通信、计算机网络教材,也可以作为本科通信专业学生、计算机专业学生、通信技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数据通信技术/伍振国主编. —北京:中国铁道出版社,2009.9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-113-10495-5

I. 数… II. 伍… III. 数据通信—通信技术—高等学校—
教材 IV. TN919

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 154134 号

书 名:数据通信技术
作 者:伍振国 主编

责任编辑:武亚雯 电话:010-51873134 电子信箱:tdzhuminjie@163.com
编辑助理:朱敏洁
封面设计:崔丽芳
责任校对:孙 玫
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社 (100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

版 次:2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16 印张:17.5 字数:439 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-10495-5/TN·173

定 价:33.80 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

数据通信技术是通信技术与计算机技术的结合。在信息社会,文字、语音、视频及其他信息以数据的形式进行传输、交换、储存、处理。人类的生、产、生活、工作、学习、娱乐都离不开数据。原有的电话通信网、数据通信网、CATV 三个网络正在加速融合,数据通信网是三网合一的统一通信平台,“Every thing over IP”是通信网络发展的趋势。

本书主要分析研究如何无差错的传输、交换数据,如何高效的传输数据,如何提高数据的传输质量,如何管理维护数据通信网。

本书共 10 章,第 1~5 章介绍数据、数据通信网络、数据传输、数据交换、数据传输差错控制、数据通信网络体系结构等基本理论和基本知识。如果在此之前已经学习了通信原理,则第 2 章的数据传输、第 3 章的数据传输差错控制的内容可以少学或不学。

第 6 章介绍局域网,局域网是局部数据通信网。本章分析了局域网的体系结构、以太网技术、千兆以太网、千兆以太网、万兆以太网、以太网交换机的原理、虚拟局域网划分、生成树协议、校园网的组成,详细地介绍以太网交换机的管理设置、网线的制作和测试。

第 7 章介绍城域网,城域网是一个都市、一个区域的数据通信网。本章分析 IP 城域网的组成、采用的技术、核心层组成、核心路由器的组成、弹性分组环原理、核心路由器的线路卡、PPP 协议、PPPOE 协议、接入层边界(接入)路由器的功能,详细地介绍接入路由器的管理设置。

第 8 章介绍广域网,广域网是覆盖全国的数据通信网。本章分析广域网分区、广域网核心层的组成、广域网的区域汇聚、广域网的省级接入、路由选择协议、VPN 原理、VPN 采用的隧道协议、用 VPN 服务器组建 VPN、用 VPN 路由器组建 VPN,详细地介绍 VPN 路由器的管理设置。

第 9 章介绍接入网,接入网是电信机房到企业、居民家庭的数据通信网。本章分析 ADSL 接入、光纤以太网接入、三网合一接入、无线局域网接入,详细地介绍无线路由器的管理设置。通常无线局域网用作移动接入,在城市轨道交通控制、铁路及其他工业领域都有使用。

第 10 章介绍因特网的应用协议,主要介绍与网络运行、维护管理必须使用的协议 SNMP、DNS、DHCP,介绍 WWW、FTP 协议、邮件系统、DNS 服务器安装、DHCP 服务器安装、邮件服务器安装。

本书编写时注意用较浅的理论知识、较通俗的语言、较多的案例分析、较多的操作实例,提高教材的实用性,希望对提高学生学习的操作能力有所帮助。

本书是课堂教学与实验、实训结合的教材。本书在编写后期受到基于工作过程教学法的影响,将原有集中的实训内容分散在有关的各章中。第5章~第10章中除了理论知识,还配有详细的实作案例。各章的“复习思考题”中,列有实作训练题。本书可以作为理论教学教材、也可以作为实训指导书。

本书由武汉铁路职业技术学院伍振国主编,并编写了第1~7章;天津铁道职业技术学院张金生编写第8、10章;湖南交通工程职业技术学院聂立文编写第9章。全书由南京铁道职业技术学院赵丽花和西安铁路职业技术学院范新龙主审。

数据通信技术是非常复杂的技术,且发展迅速,由于编者水平有限,难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

本书编著者
2009年7月

目 录

第1章 IP 信息网络概述	1
1.1 IP 信息网络的概念	1
1.2 数据通信网络的分类	4
1.3 数据通信网络的拓扑	6
1.4 数据通信网络的主要技术指标	7
1.5 三网合一	11
小 结	11
复习思考题	12
第2章 数据的传输	13
2.1 数据通信系统的组成	13
2.2 信息的传输编码	17
2.3 传输媒体	25
2.4 数据的并行与串行传输	31
2.5 单工、半双工、全双工传输	32
2.6 数据的基带传输	34
2.7 数据的模拟传输	37
2.8 数据的数字传输	42
2.9 信道复用技术	44
2.10 数字复接系统	50
2.11 数据传输的同步识别	53
小 结	53
复习思考题	54
第3章 数据传输差错控制	55
3.1 传输差错控制	55
3.2 流量控制和纠错	62
小 结	66
复习思考题	67
第4章 数据交换技术	68
4.1 电路交换技术	68
4.2 报文交换技术	70
4.3 分组交换技术	72
4.4 ATM 交换技术	76
4.5 数据交换方式的比较	77

4.6 数据通信网络提供的通信服务	78
小 结	78
复习思考题	78
第5章 网络的体系结构	79
5.1 数据通信网络体系结构	79
5.2 OSI - RM 体系结构	82
5.3 TCP/IP 体系结构	88
5.4 IP 数据报格式	92
5.5 因特网的 IP 地址	94
5.6 路由表和 IP 报转发	99
5.7 因特网控制报文协议 ICMP	100
5.8 因特网组播报文协议 IGMP	102
5.9 运输层传输控制协议 TCP	104
5.10 运输层用户数据报协议 UDP	110
5.11 网际协议 IPV6	111
5.12 安装 TCP/IP 协议	114
5.13 PING 命令的应用	114
小 结	116
复习思考题	117
第6章 局域网	118
6.1 局域网概述	118
6.2 局域网的体系结构	120
6.3 以太网技术	123
6.4 10 Mbit/s 以太网	127
6.5 100 Mbit/s 快速以太网	130
6.6 1 000 Mbit/s 以太网	133
6.7 10 Gbit/s 以太网	137
6.8 以太网交换机	140
6.9 以太网的扩展	144
6.10 虚拟局域网	145
6.11 生成树协议	148
6.12 以太网交换机的配置	151
6.13 网线制作和测试	179
小 结	182
复习思考题	183
第7章 IP 城域网	185
7.1 IP 城域网综述	185
7.2 IP 城域网核心层组成	188
7.3 PPP 协议	191

7.4 路由器的线路卡	194
7.5 PPPOE 协议	195
7.6 边界路由器	199
7.7 边界路由器的设置	202
小 结	209
复习思考题	210
第 8 章 IP 广域网	211
8.1 广域网的概念	211
8.2 路由选择协议	215
8.3 虚拟专用网络 VPN	220
小 结	231
复习思考题	231
第 9 章 接入网	233
9.1 ADSL 接入	233
9.2 光纤以太网接入	236
9.3 三网合一接入	237
9.4 无线局域网	240
小 结	251
复习思考题	252
第 10 章 应用层协议	253
10.1 SNMP 网络管理协议	253
10.2 域名系统 DNS	257
10.3 DHCP 动态 IP 地址分配	261
10.4 万维网 WWW	266
10.5 文件传送协议 FTP	268
10.6 邮件传送协议	269
小 结	271
复习思考题	272
参考文献	272

第 1 章 IP 信息网络概述

本章介绍了信息、数据、信号的概念,介绍了数据通信网络、IP 信息网络的概念,分析了数据通信网络的分类和数据通信网络的拓扑结构,分析了数据通信网络的主要技术指标。

1.1 IP 信息网络的概念

1.1.1 信息、数据、信号

1. 信息(Information)

在 GB 489885《情报与文献工作词汇基本术语》中,关于“信息”的解释是“Information 是物质存在的一种方式、形态或运动状态,也是事物的一种普遍属性,一般指数据、消息中所包含的意义,可以使消息中所描述事件的不定性减少”。信息表征精确的事物,如数字、文字、语音、图形和图像等。在数据通信中,信息通常用二进制或多进制代码表示。例如通过键盘给计算机输入信息“A”,是把“A”的信息编码输入到计算机。计算机将文档传送到打印机,打印输出文字信息。信息用精确的二进制编码表示。目前常用的信息代码有国际 5 号码,美国信息交换用标准代码 ASCII 码等。语音信息的编码将语音信息抽样、量化、编码,因此一个语音编码对应一个特定的语音信息。数据通信网络传输交换的是代表信息的二进制编码。

2. 数据(Data)

在数据通信中,数据通常是指网络中传输交换的数字形式的数据,即由二进制或多进制数组成的数字序列。数据与信息区别在于,数据是信息的数字编码表示,而信息是这些数据表达的内容和解释。

3. 信号(Signal)

信号是数据的物理表示。通信系统中信号是数据在传输过程中电、光的电磁波形式。如传输线路是铜导线,则信号用电流、电压表示。如二进制数据的“1”表示“+3 V”,二进制数据的“0”表示“-3 V”;如传输线路是光纤,则用光脉冲的“有”、“无”表示为“1”和“0”。通常,表示数据的信号分为数字信号和模拟信号两种(见图 1-1)。其中模拟信号是一种连续变化的信号。例如:电话线上传送的按照话音产生的电信号就是模拟信号。数字信号是离散的、不连续的。

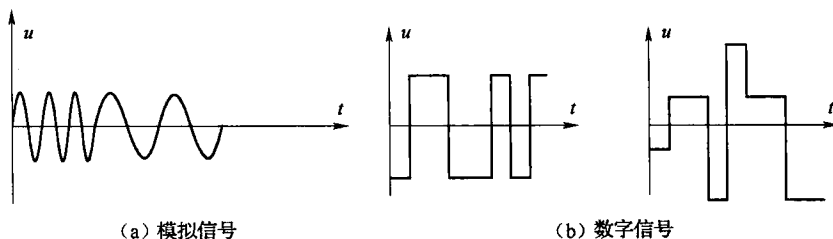


图 1-1 数字信号和模拟信号波形图

1.1.2 数据通信网络(Data Communication Network)

1925 年出现莫尔斯电码和有线电报后,人类开始把电报用于远距离传输文字、阿拉伯数字等信息,信息用“0”、“1”数字形式的代码表示,在电报网络中传输交换的是“0”、“1”表示的二进制数据。在计算机网络出现之前,电报网络也用于传输计算机数据。电报使用 5 bit 的二进制编码代表一个英文字母或阿拉伯数字,而我国用 4 个阿拉伯数字代表一个汉字。初期的电报通信是点对点的通信,在发明使用电报交换机之后,建立了自动电报交换网络,在电报网络中实现信息的传输、交换。电报网络传输交换的数据单元是一个个的数据块,这些数据块称之为“报文”,报文由报头和数据两部分组成。报头由目的地址(收报人地址)和源地址(发报人地址)及其他控制信息组成。电报网络是最早的数据通信网络。我国的铁路的电报交换网络至今还在运行。

20 世纪 70 年代,美国在研制 ARPNET 时,采用了分组交换技术,自此分组数据交换网便用于传输交换计算机数据。分组交换网传输交换的数据单元是“分组”。分组是比报文更短的数据块。每个分组由头部和数据两部分组成。分组头部有目的地址、源地址和其他控制信息。

20 世纪 90 年代,分组交换网不能满足剧增的因特网的数据量,于是带宽更宽、时延更小的 ATM 交换网络投入运行。ATM 网络传输交换的数据单元叫“信元”,每个信元有 5 字节的头部,48 字节的数据,头部有地址信息和控制信息。ATM 用于传输交换因特网数据存在地址、协议转换等问题。但 ATM 太复杂,传输效率低,造价太高。

近年来,数据通信网节点交换机采用线速路由器,直接运行 IP 协议。数据通信网传输交换的数据单元是“IP 报文”,IP 报文由报文头部和数据组成。IP 报文的报头有目的 IP 地址、源 IP 地址及其他控制信息。IP 协议是因特网的支撑协议,使用 IP 协议的数据通信网络能与因特网无缝连接。

传输交换数据的通信网络称为数据通信网络。数据通信网传输交换的信息用“0”、“1”表示,传输交换的数据单元是一个个的数据包,在不同的数据通信网络中,数据包称为报文、分组、信元、数据帧等。

1.1.3 计算机网络(Computer Network)

20 世纪 70 年代,美国国防部高级计划署研制一种在战争中不中断通信的通信网,用于传输交换计算机数据,这就是计算机网络 ARPNET,它是因特网的前身。20 世纪 80 年代出现了用于近距离通信、面向办公室、面向校园、面向企业的局部数据通信网络,称为局域网。通常计算机网络中的主干网完成数据的传输和数据的交换功能。“传输”是利用通信信道将一台数据终端的数据传送到另一台设备;“交换”是利用网络的交换设备,使一台数据终端发出的数据包能在众多的网络中选择交付给一台或多台数据终端,交换能实现一台数据终端对多台数据终端的通信,扩大了数据通信的通信范围。完成数据的传输和交换的通信网称为通信子网,即数据通信网。连接在数据通信网的服务器和 PC 机是硬件资源,用于处理数据、存储数据,而储存在数据终端的数据和应用软件称为软件资源。通常将资源所在的数据终端的集合称为资源子网。计算机网络由通信子网和资源子网组成。示意图如图 1-2 所示。

有专家这样定义计算机网络:一些自治的、互连的计算机系统的集合称为计算机网络。自

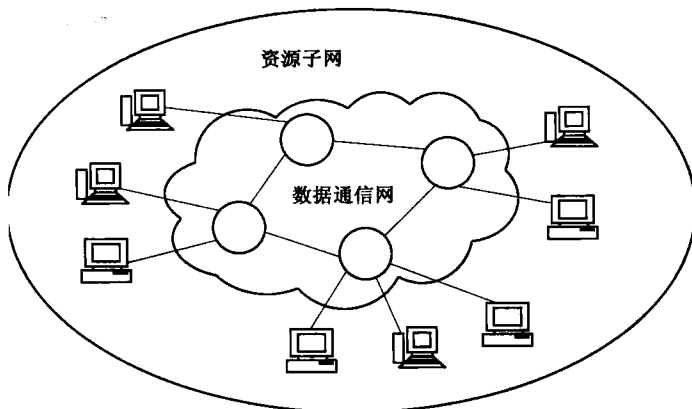


图 1-2 数据通信网和资源子网组成的计算机网络

治的计算机系统是指具有计算机硬件、计算机软件,能独立处理信息、存储信息的计算机系统。这些系统离开网络也能独立运行。互连的计算机系统是指通过数据通信网连接,能进行信息传输、信息交互。

1.1.4 IP 信息网络的定义

早期的数据通信网络的节点交换机采用存储转发方式,转发时延比较大,链路带宽也不宽,因此只能用于非实时的数据传输。随着光纤链路的应用和高速路由器应用于数据通信网,我国现在的广域数据通信网的带宽已经达到 40 Gbit/s。广域网的交换节点采用线速路由器。现在广域数据通信网不但用于传输交换计算机数据,也用于 IP 电话数据、IPTV 视频数据的传输和交换。一些新的通信公司已经不再分别建设电话网络和数据网络,而是只建设一个统一的 IP 信息网络,用于传输、交换各种信息。现在局域网的带宽已经达到 10 Gbit/s。一些企业、学校建立以以太网为统一的通信网络,在以太网上传输计算机数据、IP 电话数据、IPTV 数据及其他信息。

现在新的数据通信网(广域网、城域网)使用高速路由器作为交换设备,直接运行 IP 协议,传输交换 IP 数据报。用 IP 数据报承载各种信息。局域网虽不直接运行 IP 协议,但能很好的支持 IP 协议,IP 数据报被封装在局域网的数据帧中传输、交换。数据通信网络的各个数据

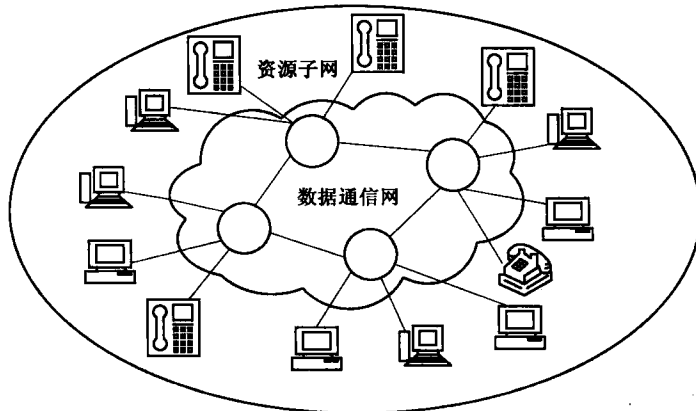


图 1-3 传输多种信息的 IP 信息网络

终端将计算机数据、语音数据、视频数据及其他信息被封装为 IP 数据报交给网络传输、交换。数据通信网执行 IP 协议,传输交换 IP 数据报,这样的数据通信网络称为 IP 信息网络,如图 1-3 所示的示意图。

1.2 数据通信网络的分类

数据通信网络有多种分类方法,其中最常见的是按网络的服务范围来分类。

1.2.1 根据网络的服务范围分类

1. 局域网 LAN(Local Area Network)

局域网是局部范围的数据通信网络,其通信范围从几公里到几十公里,一般用于企业、学校、家庭。现在局域网采用的主流技术是以太网技术。以太网由以太网交换机、数据终端的网卡、双绞线、光纤组成局部的数据通信网络。在局域网的交换机的端口连接有 PC 机、服务器和 IP 电话,局域网传输交换 PC 机、服务器的数据,也用于传送 IP 电话、IPTV。局域网的带宽是 $10 \sim 10 \times 10^3$ Mbit/s。通常局域网通过路由器连接到城域网或广域网,网内的数据终端可以通过局域、城域网、广域网与另一台数据终端通信。

2. 城域网 MAN(Metropolitan Area Network)

城域网是一个城市、一个地区的数据通信主干网,用于传输交换计算机数据、电话和其他信息。城域网的通信服务范围约为几十至几百公里。城域网互连本城区的局域网网络、汇聚城区的信息流量,通过城域网与广域网的接口,连接到广域网。城域网的带宽比局域网的更高,我国城域网带宽已经达 $1 \sim 40$ Gbit/s。从网络的层次上看,城域网是广域网和局域网(校园网、企业网)之间的桥接网络。城域网内部的结点之间需要有光纤链路相连接。城域网在最近一段时期发展较快,电信服务商建造可靠的宽带城域网,用于传送交换计算机数据、电话。广电部门建造宽带城域网,用于传输交换 IPTV 和计算机数据。城域网从技术上看,城域网采用了高速以太网技术和宽带 IP 网络技术。

3. 广域网 WAN(Wide Area Network)

广域网的通信服务范围通常为几百到几万公里,广域网是覆盖一个国家的数据通信主干网。广域网互连国内的城域网、局域网,在上万公里的广域范围内传输交换信息。广域网通过互联网出口与国际因特网连接。现在广域网采用的主流技术是宽带 IP 网络技术。IP 广域网交换节点采用线速路由器,物理链路采用光纤。我国 IP 广域网的带宽达 $10 \sim 40$ Gbit/s。广域网的链路一般都是高速光纤链路,具有较大的通信容量。广域网主要用于传输交换计算机信息、语音信息、活动视频。

4. 接入网 AN(Access Network)

接入网又称为本地接入网或居民接入网,是指电信机房到居民家庭、学校、企业的通信网络,是近年来由于用户对较高带宽的需求而出现的一种网络接入技术。接入网是个人计算机、局域网(校园网)与城域网的接口。网络规划设计人员通常把城域网分为核心层、会聚层、接入层,接入网就是城域网的接入层。如今接入网已有多种高速接入技术,如 ADSL 接入、以太网接入、光纤同轴混合接入、三网合一接入。现在用户接入到因特网的带宽已经得到很大程度上的改善。

广域网、城域网、接入网、局域网的关系如图 1-4 所示。

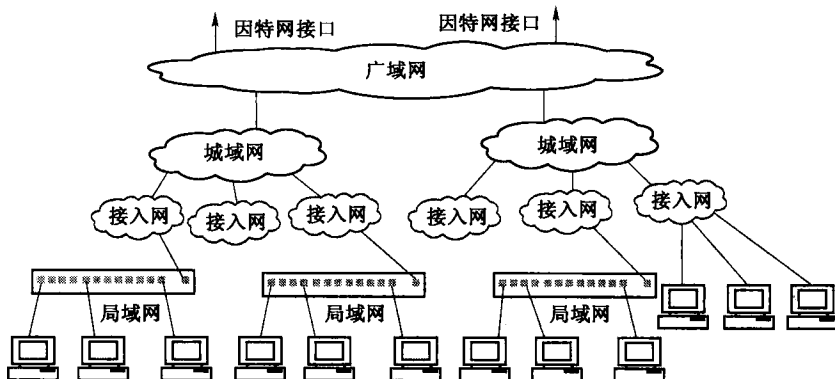


图 1-4 广域网、城域网、接入网、局域网的关系

1.2.2 根据信道的占用情况分类

1. 广播信道数据通信网

在采用广播信道的通信子网中,一个公共通信信道被多个节点使用,如图 1-5 所示。在任一时间内只允许一个节点使用公共通信信道,当一个节点利用公共通信信道“发送”数据时,其他节点只能“监听”正在发送的数据。使用公共总线、公共无线信道的数据通信网络都是广播信道数据通信网络。

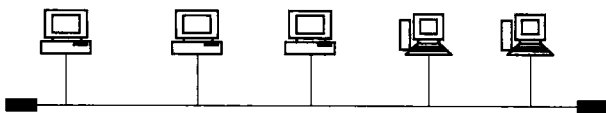


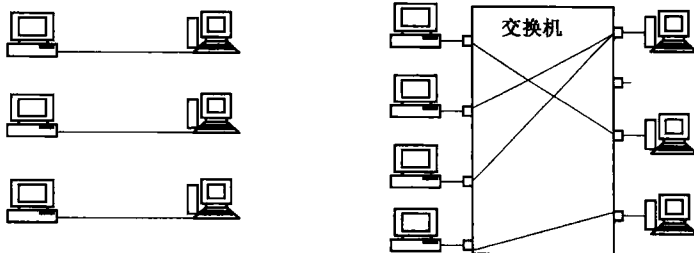
图 1-5 广播信道数据通信网

2. 独占信道数据通信网

独占信道数据通信网的一种是点对点线路连接的数据通信,每对通信线路连接一对节点,如图 1-6(a)所示。

3. 交换式网络

交换式网络是独占信道数据通信网的改进,造价更低,通信范围更大。交换式网络必须有一台或多台节点交换机,如以太网交换机、路由器等,每台数据终端通过一条物理线路连接到交换机,如图 1-6(b)所示。交换机以存储转发式工作或空分交换式工作。终端传送数据,交



(a) 点对点固定连接独占信道网络

(b) 交换式连接独占信道网络

图 1-6 独占信道数据通信网

换机为源、目终端接通一条链路。

1.3 数据通信网络的拓扑

1.3.1 数据通信网络拓扑的定义

1. 拓扑

拓扑是指点和连接这些点的连线所组成的几何图形。拓扑学是几何学中的一个分支,它是图论的一部分。从拓扑学角度出发,首先把网络设备抽象为与其大小、形状无关的圆点,并将连接网络设备的线路抽象为连线,将点和线连接起来,进而研究点、线及平面之间的关系。

2. 数据通信网络拓扑

数据通信网络拓扑是通过数据网络中的各个节点与通信线路之间的几何关系来表示网络结构,并反映网络中各设备之间的关系。数据通信网中的通信终端、网络交换机及其他通信设备称为节点,通信线路称为链路,而将节点和链路连接而成的几何图形称为网络的拓扑结构。拓扑结构在网络规划设计、网络学习中有重要的作用。

3. 分析网络拓扑的意义

网络的拓扑结构与网络的通信性能、网络的可靠性、网络的造价密切相关。不同用途的网络选用不同的拓扑结构。

1.3.2 数据通信网络拓扑分类

数据通信网络常见的基本拓扑结构有:星型、环型、总线型、格型、树型等。网络拓扑如图1-7所示。

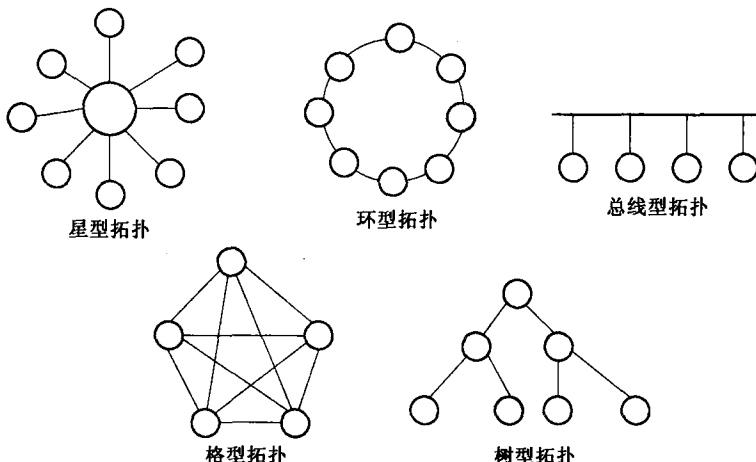


图1-7 数据通信网的拓扑

1. 星型拓扑结构

在星型拓扑网络结构中,有一个中心节点,每个节点都由单独的通信线路连接到中心节点上。中心节点控制全网的通信,任何两个节点相互通信,都必须经过中心节点。因此,中心节点的负荷较重,中心节点的可靠性将影响全局的安全,是网络的瓶颈。星型拓扑属于集中控制

式网络。用一台以太网交换机、传输线、计算机组成的局域网是星型网络,以太网交换机是中心节点设备。

2. 环型拓扑结构

在环型拓扑网络结构中,各个节点通过通信线路,首尾相接,形成闭合的通信环。环中的数据沿一个方向传输。环形网络多使用光纤,构成高速网络。环型拓扑结构简单,传输延迟固定,线路投资少。单环结构的网络环中的任何一个节点发生故障,都会导致全网中断通信,各个节点都可能成为网络的安全瓶颈。通常环形网络使用双环结构,数据在两个相反方向同时传输。双环互为冗余备用,在故障时能重构为单环,使通信不中断。双环结构的网络通常用于IP城域网、IP广域网。

3. 总线型拓扑结构

在总线拓扑网络结构中,使用一对传输线路作为传输介质,所有数据通信设备都通过接口并接在总线上。在总线拓扑结构中,每一个节点发送的数据都在总线中传送,并被网络上其他节点所监听,当节点监听到数据是发给本站时,将其接收,否则将其丢弃。总线拓扑网络任何时刻只能有一个节点使用公用总线传送数据,当有两个节点同时发送数据时将产生冲突,数据将出现错误。总线上的所有节点共享总线的带宽,网络的效率也随着节点数目的增加而下降。因为总线上的所有节点都要使用公共总线通信,因此必须有一个通信规则控制各个节点对总线的使用。

4. 格型拓扑结构

网状结构的网络,是由分布在不同地理位置的网络交换设备、路由器使用传输线路连接而构成的。每个节点都有两条以上的链路连接到其他节点。网状结构的网络可靠性很高,通常用于构成大规模的广域网。在网状结构的IP广域网、城域网上,节点通常是高速路由器,连接节点的链路是光纤线路。

5. 树型网状拓扑结构

树型网络拓扑结构是星型网络拓扑结构的扩展,其形状是一棵倒置的树。它采用分层结构,具有一个根节点和多层分支节点。树形网络中除了叶节点之外,根节点和树枝节点通常是数据网络的交换节点,在局域网中它是局域网交换机。树型网络拓扑的各个节点按层次进行连接,数据的交换主要在上下节点间进行,树型网络拓扑属于集中控制式网络,适用于分级管理的场合。一般校园网多采用树型拓扑结构。

1.4 数据通信网络的主要技术指标

1.4.1 数据传输速率

1. 码元传输率(R_B)

信道每秒传送码元的数量称为码元传输率,单位为波特。码元是携带数据的单位,码元通常用信号波形表示,信号波形可以是矩形波、光脉冲,也可以是调频波、调幅波、调相波,每秒通过信道传输的码元个数称为码元传输率或调制速率,其单位为波特(Baud)。例如某电报线路3 s内传输5 400个码元,则码元传输率为1 800 Baud。

码元速率 R_B 只与码元宽度 T_B 有关,码元速率与码元宽度 T_B 的关系如下式所示:

$$R_B = 1/T_B$$

2. 数据传输率(R_b)

数据传输率是指数字信道每秒传输的二进制数据量,也称为信息传输率。数据传输率也称为带宽,是表征信道的二进制数据传输能力。传统的模拟通信信道的带宽是指各种不同频率成分的信号所占用的频率范围。例如,在电话线路上传送的电话信号的频带范围为 0.3 ~ 3.4 kHz,其带宽是 3.1 kHz。“带宽”表示模拟信道的传输能力。模拟信道的带宽单位是 Hz、kHz、MHz 等。

当数字信道用来传送数据时,单位时间内传输的二进制数据位的数量称为数据传输率 R_b ,或称为比特率、信息传输速率。数据传输率是表示数字信道传输二进制数据的能力。人们习惯与模拟信道的“带宽”相比,将表示信道传输能力的“数据传输率”称为“带宽”。

网络或数字信道带宽的单位就是“比特/秒”,记为 bit/s (bit per second)。常用的带宽单位是千比特每秒 kbit/s (10^3 bit/s)、兆比特每秒 Mbit/s (10^6 bit/s)、吉比特每秒 Gbit/s (10^9 bit/s)、太比特每秒 Tbit/s (10^{12} bit/s)。

对于二进制,数据传输率 R_b = 码元传输率 R_B ; 对于 M 进制, R_b 与 R_B 的关系为

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M$$

1.4.2 数据通信网络的差错率

差错率是数据通信网数据传输正确性的指标,表示单位时间内系统传输数据出现错误的比率,通常有三种表示差错率的方法。

1. 误码率(码元差错率)

$$P_e = \frac{\text{传输错误码元的数量}}{\text{传输码元的总数}} \quad (1-1)$$

2. 误信率(误比特率)

$$P_b = \frac{\text{错误的信息量(比特数)}}{\text{系统传输的总信息量(比特数)}} \quad (1-2)$$

3. 码组差错率

一个码组是由若干个码元组成,码元的错误可能会引起码组的错误,码组差错率为

$$P_g = \frac{\text{错误的码组数}}{\text{系统传输的总码组数}}$$

1.4.3 数据通信网络的时延

时延是指一个报文或分组从网络(或一条链路)的一端传送到网络的另一端所需的时间。需要注意的是,时延是由以下几个不同的部分组成的。

1. 发送时延

发送时延是节点在发送数据时,将数据块从节点发送入传输媒体所需要的时间,也就是从发送数据块的第一个比特开始算起,到最后—个比特发送完毕所需的时间。

$$\text{发送时延} = \frac{\text{数据块长度}}{\text{信道带宽}} (\text{s})$$

2. 传输时延

传输时延是数据以电磁波的形式在信道中传输一定的距离所花费的时间。传输时延的计

算公式是

$$\text{传输时延} = \frac{\text{信道长度}}{\text{电磁波在信道的传播速度}} (\text{s})$$

电磁波在自由空间的传播速率是光速,即 $3.0 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。电磁波在网络传输媒体中的传输速率比在自由空间要略低一些:在铜线电缆中的传输速率约为 $2.3 \times 10^5 \text{ km/s}$,在光纤中的传输速率约为 $2.0 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。例如,北京到广州的光纤线路长约 2 000 km,产生的传输时延大约为 10 ms。传输时延取决于线路(光纤、铜线电缆)的长度和电磁波在媒体的传播速度。

3. 处理时延

处理时延是交换节点对进入节点的数据进行识别、存储、转发所花费的时间。在节点的缓存队列中数据分组排队产生的时延是处理时延的重要组成部分。因此,处理时延与网络当时的通信量有关。当网络的通信量很大时,会发生队列溢出,使分组丢失。有时可用排队时延作为处理时延。

数据传输的总时延就是以上三种时延之和,即

$$\text{总时延} = \text{传播时延} + \text{发送时延} + \text{处理时延}$$

提高网络链路的带宽,可以减少发送时延;提高网络节点交换机(路由器、以太网交换机)交换能力,能减少节点机的处理时延,而传播时延与传播距离和介质有关。

1.4.4 传输时延带宽积

将传输时延与带宽相乘,得到另一个很有用的度量——传输时延带宽积,即

$$\text{时延带宽积} = \text{传输时延} \times \text{带宽}$$

传输时延带宽积可以用如图 1-8 所示的管道模型来表示。该图有一个代表链路的圆柱形管道,管道的长度是链路的传输时延(用时间表示其长度),而管道的截面积是链路的带宽,时延带宽积就表示这个管道的体积,也即表示链路可容纳比特数量。链路可容纳比特数量说明当发送端停止发送,接收端停止接收时滞留在链路中的比特数量。

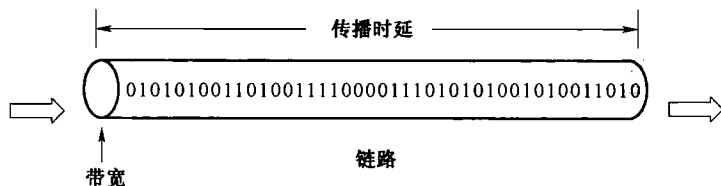


图 1-8 传输数据的管道

例如,设某段链路的传播时延为 20 ms,带宽为 10 Gbit/s,则

$$\text{时延带宽积} = 20 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^9 = 2 \times 10^8 (\text{bit})$$

若发送端连续地发送数据,在发送的第一个比特即将到达终点时,发送端已经发送了 $2 \times 10^8 \text{ bit}$ 的数据,而这 $2 \times 10^8 \text{ bit}$ 都正在链路上传输。有时在发送端和接收端之间连有几个节点、几个网络,发送端发送出去的数据要经过多次转发才能到达接收端。这时管道的时延是从发送端到接收端的所有时延的总和,包括在所有各中间节点产生的处理时延和发送时延。管道只是一种抽象的概念,管道中的比特数量表示已经从发送端发出,但尚未到达接收端的比特数量。

在数据通信网络中,往返时延也是一个重要的性能指标,它表示从发送端开始发送数据,