内 容 简 介

本书是计算机技术与软件专业技术资格考试用书。作者在前5版的基础上，针对考试的重点内容做了较大篇幅的修订，书中主要内容包括数据通信、局域网、无线通信网、网络互连、网络安全、网络操作系统与应用服务器、组网技术、网络管理、网络规划和设计。

本书是参加网络工程师考试的必备教材，也可作为网络工程从业人员学习网络技术的教材或日常工作的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

网络工程师教程 / 张永刚, 王涛, 高振江主编 .
6 版 . -- 北京 : 清华大学出版社 , 2024. 8. -- (全国
计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试用书).
ISBN 978-7-302-66919-7

Ⅰ. TP393

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024XB2187 号

责任编辑：杨如林　邓甄臻
封面设计：杨玉兰
责任校对：徐俊伟
责任印制：沈　露

出版发行：清华大学出版社
网　　址：https://www.tup.com.cn，https://www.wqxuetang.com
地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座　**邮　　编：**100084
社 总 机：010-83470000　**邮　　购：**010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市龙大印装有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×230mm　**印　张：**24.25　**防伪页：**1　**字　数：**587 千字
版　　次：2004 年 7 月第 1 版　2024 年 10 月第 6 版　**印　次：**2024 年 10 月第 1 次印刷
定　　价：89.00 元

产品编号：104534-01

第 6 版前言

考虑到信息系统国产化换代和网络安全防护需求，本次修编进一步对交换机和路由器的配置以及服务器操作系统配置进行了替换，对部分章节内容进行了精简和合并，增加了 4G、5G、国产操作系统、网络安全防范等技术内容。各章的作者如下：齐勇编写了第 1 章；王涛和严体华编写了第 2 章、第 3 章和第 4 章；高振江编写了第 5 章；张永刚编写了第 6 章和第 7 章；景为编写了第 8 章和第 10 章；张珂编写了第 9 章。

编　者
2024 年 5 月

目　录

第 3 章　局域网

传统局域网（Local Area Networks，LAN）是分组广播式网络，这是局域网与分组交换式广域网的主要区别。在广播网络中，所有工作站都连接到共享的传输介质上，共享信道的分配技术是局域网的核心技术，而这一技术又与网络的拓扑结构和传输介质有关。而且这种网络协议包含在 IEEE LAN/MAN 委员会制定的标准中。本章介绍几种常见的局域网相关国际标准，以及其工作原理和性能分析方法。

3.1　局域网技术概论

拓扑结构和传输介质决定了各种 LAN 的特点，决定了它们的数据速率和通信效率，也决定了其适合传输的数据类型，甚至决定了网络的应用领域。本节首先概述各种局域网使用的拓扑结构和传输介质，同时介绍两种不同的数据传输系统，最后引出根据以上特点制定的 IEEE 802 标准。

3.1.1　拓扑结构和传输介质

1. 总线拓扑

总线（如图 3-1（a）所示）是一种多点广播介质，所有的站点都通过接口硬件连接到总线上。工作站发出的数据组织成帧，数据帧沿着总线向两端传播，到达末端的信号被终端匹配器吸收。数据帧中含有源地址和目标地址，每个工作站都监视总线上的信号，并复制发给自己的数据帧。由于总线是共享介质，多个站点同时发送数据时会发生冲突，因而需要一种分解冲突的介质访问控制协议。传统的轮询方式不适合分布式控制，总线网的研究者开发了一种分布式竞争发送的访问控制方法，本章将介绍这种协议。

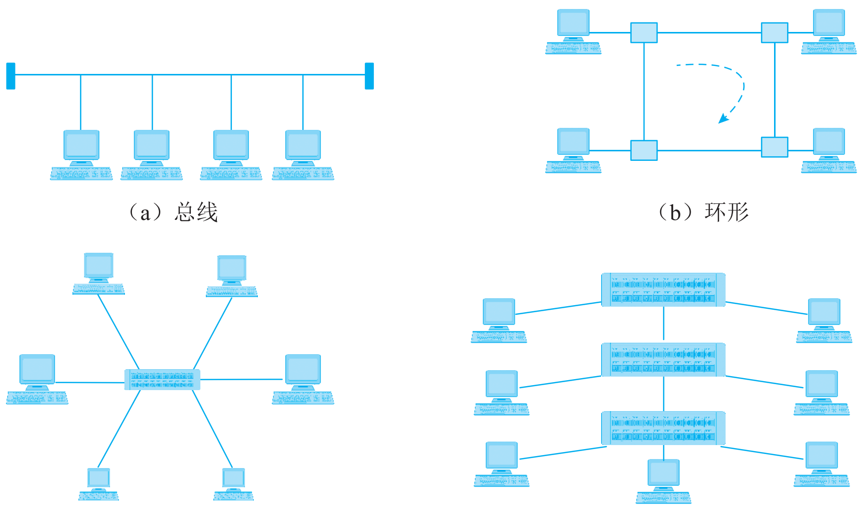
适用于总线拓扑的传输介质主要是同轴电缆，分为传播数字信号的基带同轴电缆和传播模拟信号的宽带同轴电缆，这两种传输介质的比较如表 3-1 所示。

表 3-1　总线网的传输介质

传输介质	数据速率（Mb/s）	传输距离（km）	站点数
基带同轴电缆	10，50（限制距离和节点数）	<3	100
宽带同轴电缆	500 个信道，每个信道 20	<30	1000

对于总线这种多点介质，必须考虑信号平衡问题。任意一对设备之间传输的信号强度必须调整到一定的范围：一方面，发送器发出的信号不能太大，否则会产生有害的谐波，使得接收电路无法工作；另一方面，经过一定距离的传播衰减后，到达接收端的信号必须足够大，能驱动接收器电路，还要有一定的信噪比。如果总线上的任何一个设备都可以向其他设备发送数据，

对于一个不太大的网络，譬如 200 个站点，则设备配对数是 39 800。因此，要同时考虑这么多对设备之间的信号平衡问题，从而设计出适用的发送器和接收器是不可能的。在制定网络标准时，考虑到这一问题的复杂性，所以把总线划分成一定长度的网段，并限制每个网段接入的站点数。



（a）总线　（b）环形

（c）星形　（d）树状

图 3-1　局域网的拓扑结构

1）基带系统

数字信号是一种电压脉冲，它从发送处沿着基带电缆向两端均匀传播，这种情况就像光波在以太介质（物理学家们杜撰的）中各向同性地均匀传播一样，所以总线网的发明者把这种网络称为以太网。以太网使用特性阻抗为 50Ω 的同轴电缆，这种电缆具有较小的低频电噪声，在接头处产生的反射也较小。

一般来说，传输系统的数据速率与电缆长度、接头数量以及发送和接收电路的电气特性有关。当脉冲信号沿电缆传播时，会发生衰减和畸变，还会受到噪音和其他不利因素的影响。传播距离越长，这种影响越大，增加了出错的机会。如果数据速率较小，脉冲宽度就比较宽，比高速的窄脉冲更容易恢复，因而抗噪声特性更好。基带系统的设计需要在数据速率、传播距离、站点数量之间进行权衡。一般来说，数据速率越小，传输的距离越远；传输系统（收发器和电缆）的电气特性越好，可连接的站点数就越多。表 3-2 列出了 IEEE 802.3 标准中对两种基带电缆的规定。这两种系统的数据速率都是 10Mb/s，但传输距离和可连接的站点数不同，这是因为直径为 0.4 英寸（1 英寸 =2.54 厘米）的电缆比直径为 0.25 英寸的电缆性能更好，当然价格也较昂贵。

表 3-2　IEEE 802.3 标准中对两种基带电缆的规定

参　数	10Base 5	10Base 2
电缆直径	0.4in（RG-11）	0.25in（RG-58）
数据速率	10Mb/s	10Mb/s

（续表）

参　数	10Base 5	10Base 2
最大段长	500m	185m
传播距离	2500m	1000m
每段节点数	100	30
节点距离	2.5m	0.5m

若要扩展网络的长度，可以用中继器把多个网络段连接起来，如图 3-2 所示。中继器可以接收一个网段上的信号，经再生后发送到另一个网段上去。然而，由于网络的定时特性，不能无限制地使用中继器，表 3-2 中的两个标准都将中继器的数目限制为 4 个，即最大网络由 5 段组成。

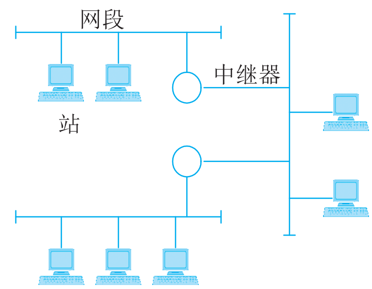


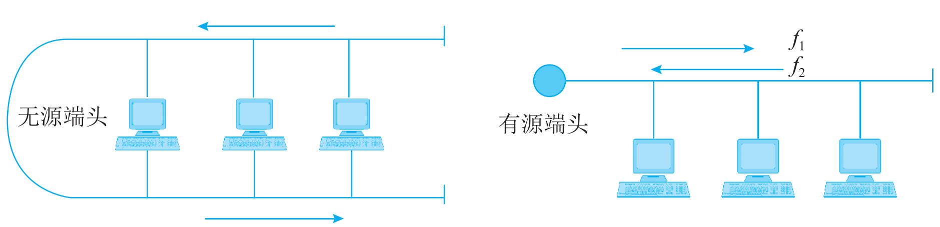
图 3-2　由中继器互连的网络

2）宽带系统

宽带系统是指采用频分多路技术传播模拟信号的系统。不同频率的信道可分别支持数据通信、TV 和 CD 质量的音频信号。模拟信号比数字脉冲受噪声和衰减的影响更小，可以传播更远的距离，甚至达到 100km。

宽带系统使用特性阻抗为 75Ω 的 CATV 电缆。根据系统中数 / 模转换设备采用的调制技术的不同，1b/s 的数据速率可能需要 1 ～ 4Hz 的带宽，而支持 150Mb/s 的数据速率可能需要 300MHz 的带宽。

由于宽带系统中需要模拟放大器，而这种放大器只能单方向工作，所以加在宽带电缆上的信号只能单方向传播，这种方向性决定了在同一条电缆上只能由“上游站”发送，“下游站”接收，相反方向的通信则必须采用特殊的技术。有两种技术可提供双向传输：一种是双缆配置，即用两根电缆分别提供两个方向不同的通路（如图 3-3（a）所示）；另一种是分裂配置，即把单根电缆的频带分裂为两个频率不同的子通道，分别传输两个方向相反的信号（如图 3-3（b）所示）。双缆配置可提供双倍的带宽，而分裂配置比双缆配置可节约大约 15% 的费用。



（a）双缆配置　　（b）分裂配置

图 3-3　宽带系统中实现双向传输的两种配置

两种电路配置都需要“端头”来连接两个方向不同的通路。双缆配置中的端头是无源端头，朝向端头的通路称为“入径”，离开端头的通路称为“出径”。所有的站向入径上发送信号，经端头转接后发向出径，各个站从出径上接收数据。入径和出径上的信号使用相同的频率。

在分裂配置中使用有源端头，也叫频率变换端头。所有的站以频率 f_1 向端头发送数据，经端头转换后以频率 f_2 向总线上广播，目标站以 f_2 接收数据。

2. 环形拓扑

环形拓扑由一系列首尾相接的中继器组成，每个中继器连接一个工作站（如图 3-1（b）所示）。中继器是一种简单的设备，它能从一端接收数据，然后在另一端发出数据。整个环路是单向传输的。

工作站发出的数据组织成帧。在数据帧的帧头部分含有源地址和目标地址字段，以及其他控制信息。数据帧在环上循环传播时被目标站复制，返回发送站后被回收。由于多个站共享环上的传输介质，所以需要某种访问逻辑来控制各个站的发送顺序。

由于环网是一系列点对点链路串接起来的，所以可使用任何传输介质。最常用的介质是双绞线，因为它们价格较低。使用同轴电缆可得到较高的带宽，而光纤则能提供更大的数据速率。表 3-3 中列出了常用的几种传输介质的有关参数。

表 3-3　环网的传输介质

传输介质	数据速率（Mb/s）	中继器之间的距离（km）	中继器个数
无屏蔽双绞线	4	0.1	72
屏蔽双绞线	16	0.3	250
基带同轴电缆	16	1.0	250
光纤	100	2.0	240

3. 星形拓扑

星形拓扑中有一个中心节点，所有站点都连接到中心节点上。电话系统就采用了这种拓扑结构，多终端联机通信系统也同样采用星形拓扑结构。中心节点在星形网络中起到控制和交换的作用，是网络中的关键设备。星形拓扑的网络布局如图 3-1（c）所示。

用星形拓扑结构也可以构成分组广播式的局域网。在这种网络中，每个站都用两对专线连接到中心节点上，一对用于发送，一对用于接收。中心节点叫作集线器（Hub）。Hub 接收工作站发来的数据帧，然后向所有的输出链路广播出去。当有多个站同时向 Hub 发送数据时就会产生冲突，这种情况和总线拓扑中的竞争发送一样，因而总线网的介质访问控制方法也适用于星形网。

Hub 有两种形式，一种是有源 Hub，另一种是无源 Hub。有源 Hub 中配置了信号再生逻辑，这种电路可以接收输入链路上的信号，经再生后向所有输出链路发送。如果多个输出链路同时有信号输入，则向所有输出链路发送冲突信号。

无源 Hub 中没有信号再生电路，这种 Hub 只是把输入链路上的信号分配到所有的输出链路上。如果使用的介质是光纤，则可以把所有的输入光纤熔焊到玻璃柱的两端，如图 3-4 所示。当有光信号从输入端进来时就照亮了玻璃柱，从而也照亮了所有输出光纤，这样就起到了光信号的分配作用。

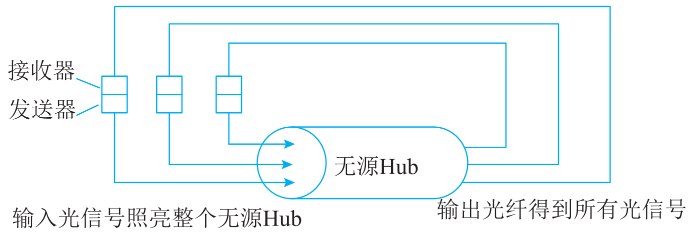


图 3-4　无源星形光纤网

任何有线传输介质都可以使用有源 Hub，也可以使用无源 Hub。为达到较高的数据速率，必须限制工作站到中心节点的距离和连接的站点数。一般来说，无源 Hub 用于光纤或同轴电缆网络，有源 Hub 则用于无屏蔽双绞线网络。表 3-4 列出了几种传输介质的有代表性的网络参数。

表 3-4　星形网的传输介质

传输介质	数据速率（Mb/s）	从站到中心节点的距离（km）	站数
无屏蔽双绞线	1 ～ 10	0.5（1Mb/s），0.1（10Mb/s）	几十个
基带同轴电缆	70	<1	几十个
光纤	10 ～ 20	<1	几十个

为延长星形网络的传输距离和扩大网络的规模，可以把多个 Hub 级联起来，组成树状结构，如图 3-1（d）所示。这棵树的根是头 Hub，其他节点叫中间 Hub，每个 Hub 都可以连接多个工作站和其他 Hub，所有的叶子节点都是工作站。图 3-5 抽象地表示出头 Hub 和中间 Hub 的区别。头 Hub 可以完成上述 Hub 的基本功能，然而中间 Hub 的作用是把任何输入链路上送来的信号向上级 Hub 传送，同时把上级送来的信号向所有的输出链路广播。这样，整棵 Hub 树就完成了与单个 Hub 同样的功能：一个站发出的信号经 Hub 转接，所有的站都能收到。如果有两个站同时发送，头 Hub 会检测到冲突，并向所有的中间 Hub 和工作站发送冲突信号。

（a）头 Hub　　（b）中间 Hub

图 3-5　头 Hub 和中间 Hub

3.1.2　LAN/MAN的IEEE 802标准

IEEE 802 委员会的任务是制定局域网和城域网标准，目前有 20 多个分委员会，它们研究的内容如下：

（1）802.1 研究局域网体系结构、寻址、网络互连和网络管理。

（2）802.2 研究逻辑链路控制子层（LLC）的定义。

（3）802.3 研究以太网介质访问控制协议 CSMA/CD 及物理层技术规范。

（4）802.4 研究令牌总线网（Token-Bus）的介质访问控制协议及物理层技术规范。

（5）802.5 研究令牌环网（Token-Ring）的介质访问控制协议及物理层技术规范。

（6）802.6 研究城域网介质访问控制协议 DQDB 及物理层技术规范。

（7）802.7 宽带技术咨询组，提供有关宽带联网的技术咨询。

（8）802.8 光纤技术咨询组，提供有关光纤联网的技术咨询。

（9）802.9 研究综合声音数据的局域网（IVD LAN）介质访问控制协议及物理层技术规范。

（10）802.10 网络安全技术咨询组，定义了网络互操作的认证和加密方法。

（11）802.11 研究无线局域网（WLAN）的介质访问控制协议及物理层技术规范。

（12）802.12 研究需求优先的介质访问控制协议（100VG-AnyLAN）。

（13）802.14 研究采用线缆调制解调器（Cable Modem）的交互式电视介质访问控制协议及物理层技术规范。

（14）802.15 研究采用蓝牙技术的无线个人网（Wireless Personal Area Network，WPAN）技术规范。

（15）802.16 宽带无线接入工作组，开发 2 ～ 66GHz 的无线接入系统空中接口。

（16）802.17 弹性分组环（RPR）工作组，制定了弹性分组环网访问控制协议及有关标准。

（17）802.18 宽带无线局域网技术咨询组（Radio Regulatory）。

（18）802.19 多重虚拟局域网共存（Coexistence）技术咨询组。

（19）802.20 移动宽带无线接入（MBWA）工作组，正在制定宽带无线接入网的解决方案。

（20）802.21 研究各种无线网络之间的切换问题，正在制定与介质无关的切换业务（MIH）标准。

（21）802.22 无线区域网（Wireless Regional Area Network，WRAN）工作组，正在制定利用感知无线电技术在广播电视频段的空白频道进行无干扰无线广播的技术标准。

由于局域网是分组广播式网络，网络层的路由功能是不需要的，所以在 IEEE 802 标准中，网络层简化成了上层协议的服务访问点 SAP。又由于局域网使用多种传输介质，而介质访问控制协议与具体的传输介质和拓扑结构有关，所以，IEEE 802 标准把数据链路层划分成了两个子层。与物理介质相关的部分叫作介质访问控制（Medium Access Control，MAC）子层，与物理介质无关的部分叫作逻辑链路控制（Logical Link Control，LLC）子层。LLC 提供标准的 OSI 数据链路层服务，这使得任何高层协议（例如 TCP/IP、SNA 或有关的 OSI 标准）都可以运行于局域网标准之上。局域网的物理层规定了传输介质及其接口的电气特性、机械特性、接口电路的功能，以及信令方式和信号速率等。整个局域网的标准以及与 OSI 参考模型的对应关系如图 3-6 所示。

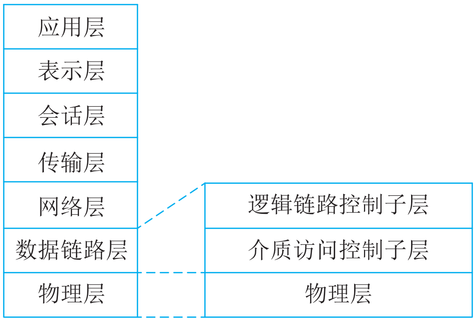


图 3-6　局域网体系结构与 OSI/RM 的对应关系

从图 3-6 中可以看出，局域网标准没有规定高层的功能，高层功能往往与具体的实现有关，包含在网络操作系统（NOS）中，而且大部分 NOS 的功能都是与 OSI/RM 或通行的工业标准协

议兼容的。

局域网的体系结构说明，在数据链路层应当有两种不同的协议数据单元，即 LLC 帧和 MAC 帧，这两种帧的关系如图 3-7 所示。从高层来的数据加上 LLC 的帧头就成为 LLC 帧，再向下传送到 MAC 子层加上 MAC 的帧头和帧尾，组成 MAC 帧。物理层则把 MAC 帧当作比特流透明地在数据链路实体间传送。

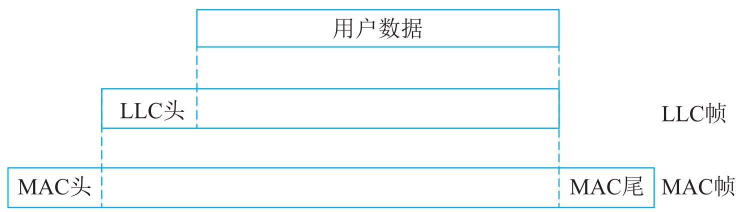


图 3-7　LLC 帧和 MAC 帧的关系

3.2　逻辑链路控制子层

逻辑链路控制子层规范包含在 IEEE 802.2 标准中。这个标准与 HDLC 是兼容的，但使用的帧格式有所不同。这是由于 HDLC 的标志和位填充技术不适合局域网，因而被排除，而且帧校验序列由 MAC 子层实现，因而也不包含在 LLC 帧结构中。另外，为了适合局域网中的寻址，地址字段也有所改变，同时提供目标地址和源地址。LLC 帧格式如图 3-8 所示，帧的类型如表 3-5 所示。

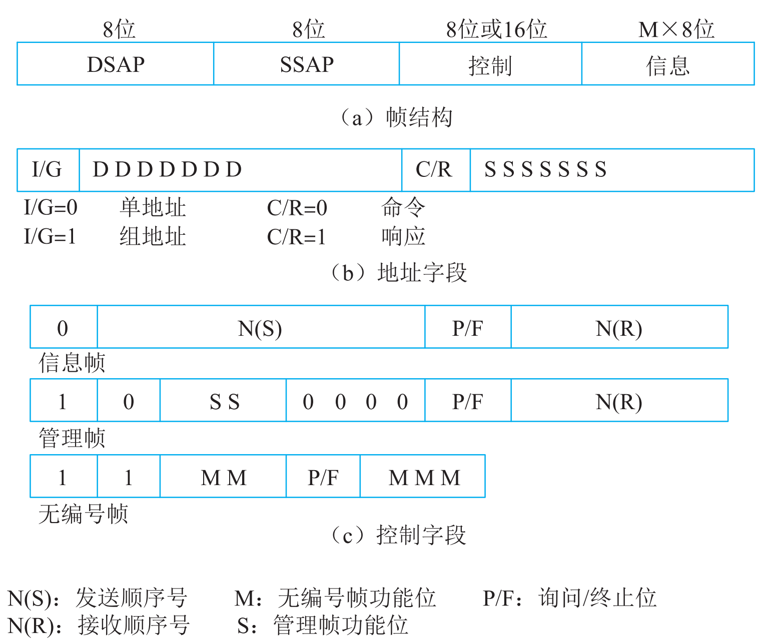


图 3-8　LLC 帧格式

表 3-5　LLC 帧类型

控制字段	控制字段编码	命　令	响　应
1. 无确认无连接服务			
无编号帧	1100*000 1111*101 1100*111	UI　无编号信息 XID　交换标识 TEST　测试	XID　交换标识 TEST　测试
2. 连接方式服务			
信息帧 管理帧	0-N(S)-*N(R) 10000000*N(R) 10100000*N(R) 10010000*N(R)	I　信息 RR　接收准备好 RNR　接收未准备好 REJ　拒绝	I　信息 RR　接收准备好 RNR　接收未准备好 REJ　拒绝
无编号帧	1111*110 1100*010 1100*110 1111*000 1110*001	SABME　置扩充异步平衡方式 DISC　断开	UA　无编号确认 DM　断开方式 FRMR　帧拒绝
3. 有确认无连接服务			
无编号帧	1110*110 1110*111	AC0　无连接确认 AC1　无连接确认	AC1　无连接确认 AC0　无连接确认

3.2.1　LLC地址

LLC 地址是 LLC 层服务访问点。IEEE 802 局域网中的地址分两级表示，主机的地址是 MAC 地址，LLC 地址实际是主机中上层协议实体的地址。一个主机可以同时拥有多个上层协议进程，因而就有多个服务访问点。IEEE 802.2 中的地址字段分别用 DSAP 和 SSAP 表示目标地址和源地址（如图 3-8 所示），这两个地址都是 8 位长，相当于 HDLC 中的扩展地址格式。另外增加的一种功能是可提供组地址，如图中的 I/G 位所示。组地址表示一组用户，而全 1 地址表示所有用户。在源地址字段中的控制位 C/R 用于区分命令帧和响应帧。

3.2.2　LLC服务

LLC 提供了以下 3 种服务。

（1）无确认无连接的服务。这是数据报类型的服务，这种服务因简单而不涉及任何流控和差错控制功能，所以不保证可靠的提交。使用这种服务的设备必须在高层软件中处理可靠问题。

（2）连接方式的服务。在有数据交换的用户间建立连接，并提供流控和差错控制功能。

（3）有确认无连接的服务。与前两种服务有交叉，它提供有确认的数据报，但不建立连接。

这 3 种服务是可选择的。用户根据应用程序的需要选择其中一种或多种服务。无确认无连接的服务一般用在以下两种情况：一种是高层软件具有流控和差错控制机制，LLC 子层就不必

提供重复的功能；另一种是连接的建立和维护机制会引起不必要的开销，因而必须简化控制。

连接方式的服务可以用在简单设备中，例如终端控制器，它只有很简单的上层协议软件，因而由数据链路层硬件实现流控和差错控制功能。

有确认无连接的服务具有高效、可靠的特点，适合传送少量的重要数据。例如，传送重要而时间紧迫的紧急控制信号。由于重要，所以需要确认；由于紧急，所以要省去建立连接的时间。

3.2.3　LLC协议

LLC 协议与 HDLC 协议兼容（如表 3-5 所示），它们之间的差别如下：

（1）LLC 用无编号信息帧支持无连接的服务，即 LLC 1 型操作。

（2）LLC 用 HDLC 的异步平衡方式支持连接方式的服务，即 LLC 2 型操作。

（3）LLC 用两种新的无编号帧支持有确认无连接的服务，即 LLC 3 型操作。

（4）通过 LLC 服务访问点支持多路复用，即一对 LLC 实体间可建立多个连接。

这 3 类 LLC 操作都使用同样的帧格式，如图 3-8 所示。LLC 控制字段使用 LLC 的扩展格式。

LLC 1 型操作支持无确认无连接的服务。无编号信息帧（UI）用于传送用户数据。这里没有流控和差错控制，差错控制由 MAC 子层完成。另外，有两种帧（XID 和 TEST）用于支持与 3 种协议都有关的管理功能。XID 帧用于交换两类信息：LLC 实体支持的操作和窗口大小。而 TEST 帧用于进行两个 LLC 实体间的通路测试。当一个 LLC 实体收到 TEST 命令帧后，应尽快发回 TEST 响应帧。

LLC 2 型操作支持连接方式的服务。当 LLC 实体得到用户的要求后可发出置扩充的异步平衡方式帧 SABME，另一个站的 LLC 实体请求建立连接。如果目标 LLC 实体同意建立连接，则以无编号应答帧 UA 回答，否则以断开连接应答帧 DM 回答。建立的连接由两端的服务访问点唯一标识。连接建立后，使用 I 帧传送数据。I 帧包含发送 / 接收顺序号，用于流控和捎带应答。另外，还有管理帧辅助进行流控和差错控制。数据发送完成后，任何一端的 LLC 实体都可发出断连帧 DISC 来终止连接。这些与 HDLC 是完全相同的。

LLC 3 型操作支持有确认无连接的服务，要求每个帧都要应答。这里使用了一种新的无连接应答帧 AC（Acknowledged Connectionless）。信息通过 AC 命令帧发送，接收方以 AC 响应帧回答。为了防止帧的丢失，使用了 1 位序列号。发送者交替在 AC 命令帧中使用 0 和 1，接收者以相反序号的 AC 帧回答，这类似于停等协议中发生的过程。

3.3　IEEE 802.3 标准

总线、星形和树状拓扑最适合的介质访问控制协议是 CSMA/CD（Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection）。早期对 CSMA/CD 协议有较大影响的是 20 世纪 70 年代美国夏威夷大学建立的 ALOHA 网络，其运行的 ALOHA 协议的效率很低，大部分时间都被工作站之间的竞争发送浪费了，后来制定的 CSMA/CD 协议效率则要高得多，详见下面的分析。

3.3.1 CSMA/CD协议

ALOHA 的主要缺点是各个工作站设置自己的传输时间，这意味着冲突概率很高，信道利用率下降。若各个站在发送前先监听信道上的发送情况，信道忙时后退一段时间再发送，可大大减少冲突概率，这就是局域网上采用的载波监听多路访问（CSMA）协议。在局域网中，最远两个站之间的传播时延很小，可避免与正在发送的站产生冲突。同时，帧的发送时间 t_f 相对于网络延迟大得多，一旦一个帧开始成功发送，可长时间保持网络中有效地传输并显著提高信道利用率。

CSMA 的基本原理：站在发送数据之前，先监听信道上是否有别的站发送的载波信号。若有，说明信道正忙，否则说明信道空闲，根据预定的策略决定：

（1）若信道空闲，是否立即发送。

（2）若信道忙，是否继续监听。

1. 监听算法

监听算法并不能完全避免发送冲突，但若对以上两种控制策略进行精心设计，则可以把冲突概率减到最小。据此，有以下 3 种监听算法（如图 3-9 所示）。

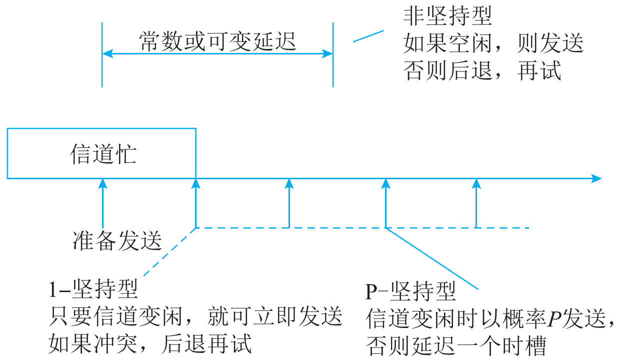


图 3-9　三种监听算法

（1）非坚持型监听算法。这种算法可描述如下：当一个站准备好帧，发送之前先监听信道。

① 若信道空闲，立即发送，否则转②。

② 若信道忙，则后退一个随机时间，重复①。

由于随机时延后退，从而减少了冲突的概率。然而，可能出现的问题是，因为后退而使信道闲置一段时间，使信道的利用率降低，而且增加了发送时延。

（2）1- 坚持型监听算法。这种算法可描述如下：当一个站准备好帧，发送之前先监听信道。

① 若信道空闲，立即发送，否则转②。

② 若信道忙，继续监听，直到信道空闲后立即发送。

这种算法的优缺点与前一种正好相反，但是，多个站同时都在监听信道时必然会发生冲突。

（3）P- 坚持型监听算法。这种算法汲取了以上两种算法的优点，但较为复杂，可描述如下：

① 若信道空闲，以概率 P 发送，以概率（$1–P$）延迟一个时间单位。一个时间单位等于网

络传输时延 τ。

② 若信道忙，继续监听直到信道空闲，转①。

③ 如果发送延迟一个时间单位 τ，则重复①。

ALOHA 算法中网络负载和信道利用率的关系曲线如图 3-10 所示。可以看出，网络负载值小的监听算法对信道的利用率有利，但是引入了较大的发送时延。

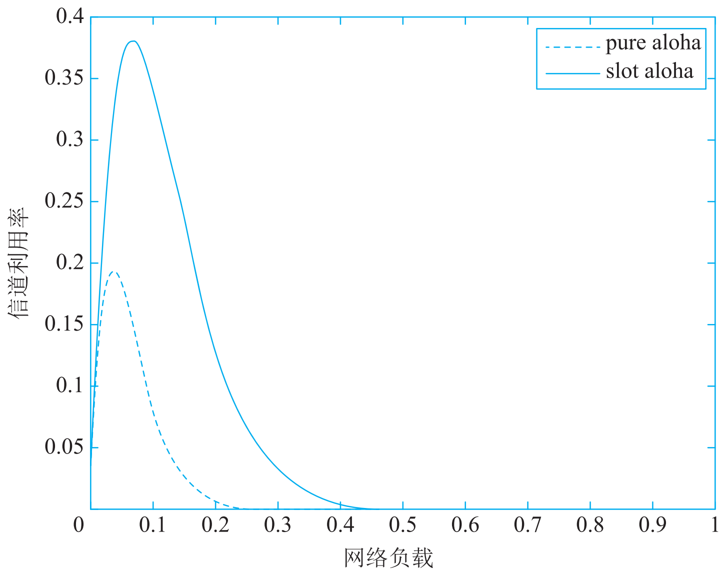


图 3-10　ALOHA 算法中网络负载和信道利用率的关系曲线

2. 冲突检测原理

载波监听只能减小冲突的概率，不能避免。若帧比较长或两个帧发生冲突还继续发送，会浪费网络带宽。为改进带宽的利用率，发送站应采取边发边听的冲突检测方法。具体方法如下：

（1）发送期间同时接收，并把接收的数据与站中存储的数据进行比较。

（2）若比较结果一致，说明没有冲突，重复（1）。

（3）若比较结果不一致，说明发生了冲突，立即停止发送，并发送一个简短的干扰（Jamming）信号，使所有站都停止发送。

（4）发送 Jamming 信号后，等待一段随机长的时间，重新监听，再试着发送。

带冲突检测的监听算法把浪费带宽的时间减少到检测冲突的时间。对局域网来说，这个时间是很短的。在图 3-11 中画出了基带系统中检测冲突需要的最长时间。这个时间发生在网

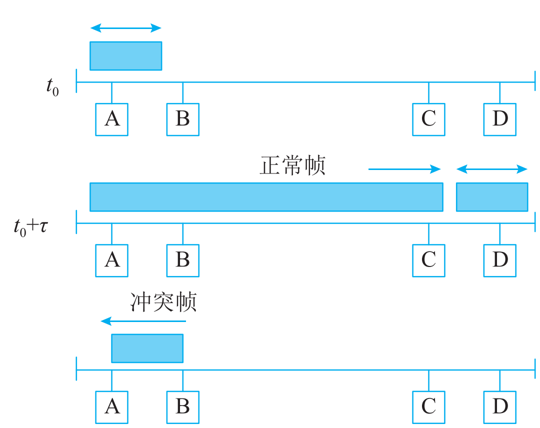


图 3-11　以太网中的冲突时间

络中相距最远的两个站（A 和 D）之间。在 t_0 时刻，A 开始发送。假设经过一段时间 τ（网络最大传播时延）后，D 开始发送。D 立即就会检测到冲突，并能很快停止。但 A 仍然感觉不到冲突，并继续发送。再经过一段时间 τ，A 才会收到冲突信号，从而停止发送。可见，在基带系统中检测冲突的最长时间是网络传播延迟的 2 倍，把这个时间叫作冲突窗口。

与冲突窗口相关的参数是最小帧长。设想图 3-11 中的 A 站发送的帧较短，在 2τ 时间内已经发送完毕，这样 A 站在整个发送期间将检测不到冲突。为了避免这种情况，网络标准中根据设计的数据速率和最大网段长度规定了最小帧长 $L_{\min}$。

$$L_{\min} = 2R \times d / v$$

其中，R 是网络数据速率，d 为最大段长，v 是信号传播速度。有了最小帧长的限制，发送站必须对较短的帧增加填充位，使其等于最小帧长。接收站对收到的帧检查长度，小于最小帧长的帧被认为是冲突碎片而丢弃。

3. 二进制指数后退算法

前面提到，检测到冲突发送干扰信号时后退一段时间重新发送。后退时间的多少对网络的稳定工作有很大影响。特别是在负载很重的情况下，为避免很多站连续发生冲突，需要设计有效的后退算法。按照二进制指数后退算法，后退时延的取值范围与重发次数 n 形成二进制指数关系。即第一次试发送时 n 的值为 0，每冲突一次 n 的值加 1，并按下式计算后退时延。

$$\begin{cases} \xi = \text{random}[0, 2^n] \\ t_\xi = \xi\tau \end{cases}$$

其中，第一式是在区间 $[0,2^n]$ 中取一均匀分布的随机整数 ξ，第二式是计算出随机后退时延。为避免无限制地重发，要对重发次数 n 进行限制，这种情况往往是信道故障引起的。通常当 n 增加到某一最大值（例如 16）时，停止发送，并向上层协议报告发送错误。

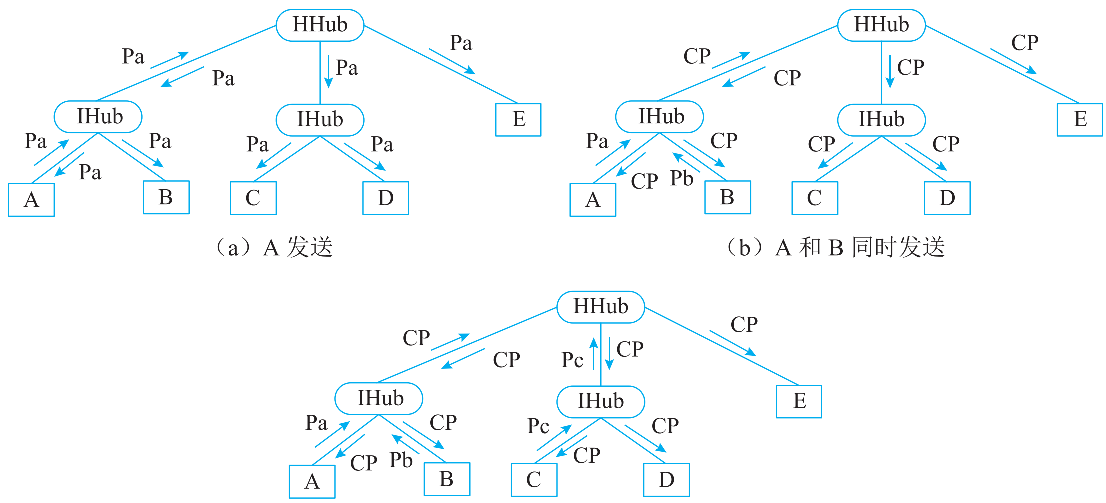
事实上，后退次数的多少往往与负载大小有关，二进制指数后退算法的优点正是把后退时延的平均取值与负载的大小联系了起来。

4. CSMA/CD 协议的实现

对于基带和宽带总线，CSMA/CD 的实现基本是相同的，但也有一些差别。差别在于：一是载波监听的实现。对于基带系统，是检测电压脉冲序列。对于宽带系统，监听站接收 RF 载波以判断信道是否空闲。二是冲突检测的实现。对于基带系统，是把直流电压加到信号上来检测冲突的；对于宽带系统，有几种检测冲突的方法：方法一是把接收的数据与发送的数据逐位比较。另一种方法用于分裂配置，由端头检查是否有破坏的数据，这种数据与正常数据的频率不同。

对于双绞线星形网，冲突检测的方法更简单（如图 3-12 所示）。Hub 监视输入端的活动，若有两处以上的输入端出现信号，则认为发生冲突，并立即产生一个“冲突出现”的特殊信号 CP，向所有输出端广播。图 3-12（a）是无冲突的情况。在图 3-12（b）中连接 A 站的

IHub 检测到冲突，CP 信号被向上传到了 HHub，并广播到所有的站。图 3-12（c）表示的是三方冲突。



（a）A 发送　　（b）A 和 B 同时发送

（c）A、B 和 C 同时发送

图 3-12　星形网的冲突检测

3.3.2　CSMA/CD协议的性能分析

下面分析传播延迟和数据速率对网络性能的影响。

吞吐率是单位时间内实际传送的位数。假设网上的站都有数据要发送，没有竞争冲突，各站轮流发送数据，则传送一个长度为 L 的帧的周期为 t_p+t_f，如图 3-13 所示。可得最大吞吐率为

$$T=\frac{L}{t_p+t_f}=\frac{L}{d/v+L/R}$$

其中，d 表示网段长度，v 为信号在铜线中的传播速度（光速的 65% ～ 77%），R 为网络提供的数据速率，或者称为网络容量。

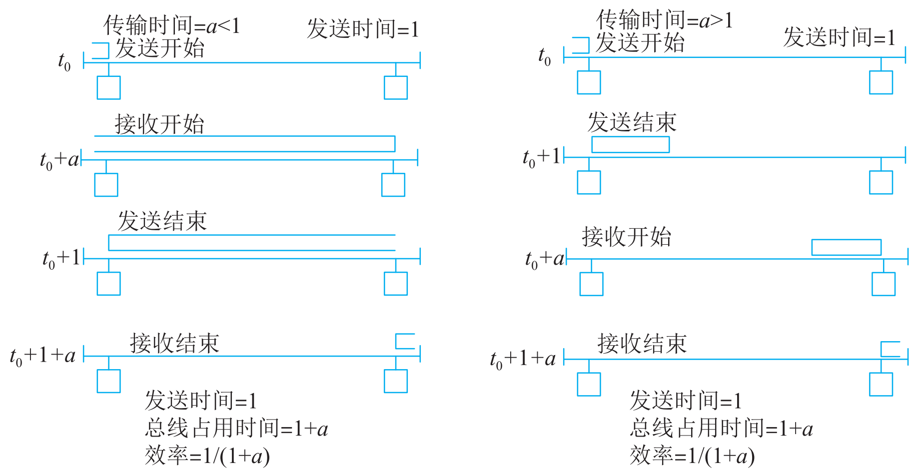
同时可得出网络利用率为

$$E=\frac{T}{R}=\frac{L/R}{d/v+L/R}=\frac{t_f}{t_p+t_f}$$

利用 $a=t_p/t_f$ 得

$$E=\frac{1}{a+1}$$

这里假定是全双工信道，MAC 子层不作应答，而由 LLC 子层进行捎带应答。得出的结论是：a（或者 Rd 的乘积）越大，信道利用率越低。表 3-6 列出了 LAN 中 a 值的典型情况。可以看出，对于大的高速网络，利用率是很低的。所以在跨度大的城域网中，同时传送的不只是一个帧，这样才可以提高网络效率。



（a）$a<1$　　（b）$a \geqslant 1$

图 3-13　*a* 对网络利用率的影响

表 3-6　*a* 值和网络利用率

数据速率（Mb/s）	帧长（位）	网络跨度（km）	*a*	1/(1+*a*)
1	100	1	0.05	0.95
1	1000	10	0.05	0.95
1	100	10	0.5	0.67
10	100	1	0.5	0.67
10	1000	1	0.05	0.95
10	1000	10	0.5	0.67
10	10 000	10	0.05	0.95
100	35 000	200	2.8	0.26
100	1000	50	25	0.04

3.3.3　MAC和PHY规范

1. MAC 帧格式

802.3 的帧格式如图 3-14 所示。

字节数	7	1	2或6	2或6	2	0~1500	0~46	4
	前导字段	帧起始符	目标地址	源地址	长度	数据	填充	校验和

图 3-14　802.3 的帧格式

每个帧以 7 个字节的前导字段开头，每个字节的值为 10101010，这种模式的编码产生 10MHz、持续 9.6μs 的方波，作为接收器的同步信号。帧起始符代码为 10101011，标志着一个帧的开始。

帧内的源地址和目标地址可以是 6 或 2 字节长，10Mb/s 的基带网使用 6 字节地址。目标地址最高位为 0 时表示普通地址，为 1 时表示组地址，向一组站发送称为组播（Multicast）。全 1 的目标地址是广播地址，所有站都接收这种帧。次最高位（第 46 位）用于区分局部或全局地

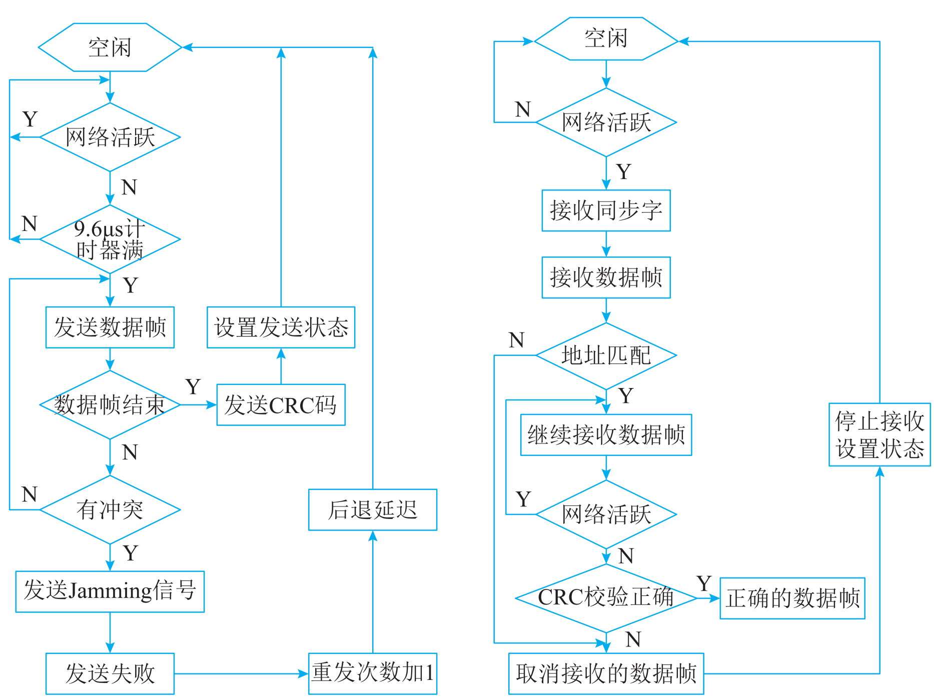
址。局部地址仅在本地网络中有效，全局地址由 IEEE 指定。

长度字段说明数据字段的长度。数据字段可以为 0，这时帧中不包含上层协议的数据。为了保证帧发送期间能检测到冲突，802.3 规定最小帧为 64 字节。这个帧长是指从目标地址到校验和的长度。由于前导字段和帧起始符是在物理层加上的，所以不包括在帧长中，也不参加帧校验。如果帧的长度不足 64 字节，要加入字节的填充位使之等于最小帧长度。

早期的 802.3 帧格式与 DIX 以太网不同，DIX 以太网用类型字段指示封装的上层协议，而 IEEE 802.3 为了通过 LLC 实现向上复用，用长度字段取代类型字段。实际上，这两种格式可以并存，两个字节可表示的数字值范围是 0 ～ 65 535，长度字段的最大值是 1500，因此 1501 ～ 65 535 之间的值都可以用来标识协议类型。这个字段的 1536 ～ 65 535（0x0600 ～ 0xFFFF）之间的值都被保留作为类型值，而 0 ～ 1500 则被用作长度的值。许多高层协议（例如 TCP/IP、IPX、DECnet 4）使用 DIX 以太网帧格式，而 IEEE 802.3/LLC 应用在 Apple Talk-2 和 NetBIOS 中。IEEE 802.3x 工作组为支持全双工操作开发了流量控制算法使得帧格式出现一些变化，新的 MAC 协议使用类型字段来区分 MAC 控制帧和其他类型的帧。

2. CSMA/CD 协议的实现

IEEE 802.3 采用 CSMA/CD 协议，这个协议的载波监听、冲突检测、冲突强化和二进制指数后退等功能都由硬件实现。这些硬件逻辑电路包含在网卡中。网卡上的主要器件是以太网数据链路控制器（Ethernet Data Link Controller，EDLC）。这个器件中有两套独立的系统，分别用于发送和接收，它的主要功能如图 3-15 所示。



（a）发送流程　　　　（b）接收流程

图 3-15　EDLC 的工作流程

IEEE 802.3 使用 1- 坚持型监听算法，因为这个算法可及时抢占信道，减少空闲期，同时实现也较简单。在监听到网络由活动变成安静后，并不能立即开始发送，还要等待一个最小帧间隔时间，只有在此期间网络持续平静，才能开始试发送。最小帧间隔时间规定为 9.6μs。

在发送过程中继续监听。若检测到冲突，发送 8 个十六进制数的序列 55555555，这就是协议规定的阻塞信号。接收站要对收到的帧进行校验。除 CRC 校验之外还要检查帧的长度。短于最小长度的帧被认为是冲突碎片而丢弃，帧长与数据长度不一致的帧以及长度不是整数字节的帧也被丢弃。另外，网卡上还有物理层的部分设备，例如 Manchester 编码器与译码器，存储网卡地址的 ROM，与传输介质连接的收发器，以及与主机总线的接口电路等。

3. 物理层规范

802.3 最初的标准规定了 6 种物理层传输介质，这些传输介质的主要参数如表 3-7 所示。

表 3-7　802.3 的传输介质

属性	Ethernet	10Base 5	10Base 2	1Base 5	10Base-T	10Broad 36	10Base-F
拓扑结构	总线	总线	总线	星形	星形	总线	星形
数据速率（Mb/s）	10	10	10	1	10	10	10
信号类型	基带曼码	基带曼码	基带曼码	基带曼码	基带曼码	宽带 DPSK	基带曼码
最大段长（m）	500	500	185	250	100	3600	500 或 2000
传输介质	粗同轴电缆	粗同轴电缆	细同轴电缆	UTP	UTP	CATV 电缆	光纤

由表 3-7 可知，Ethernet 规范与 10Base 5 相同。这里的 10 表示数据速率为 10Mb/s，Base 表示基带，5 表示最大段长为 500m。其他几种标准的命名方法类似。

10Base 5 采用特性阻抗为 50Ω 的粗同轴电缆。这种网络的收发器不在网卡上，而是直接与电缆相连，称为外收发器，如图 3-16 所示。若通信距离较远，可以用中继器（repeater）把两个网络段连接在一起。10Base 2 标准可组成一种廉价网络，收发器包含在工作站内的网卡上，使用 T 型连接器和 BNC 接头直接与电缆相连，如图 3-17 所示。由于数据速率相同，10Base 2 网段和 10Base 5 网段可用中继器混合连接。

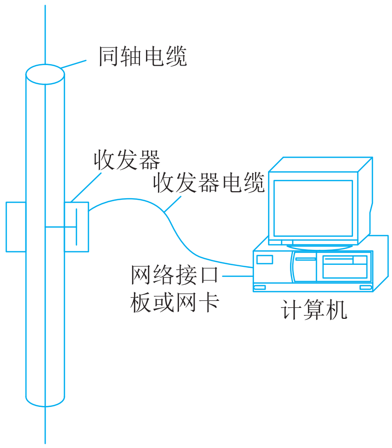


图 3-16　10Base 5 的收发器

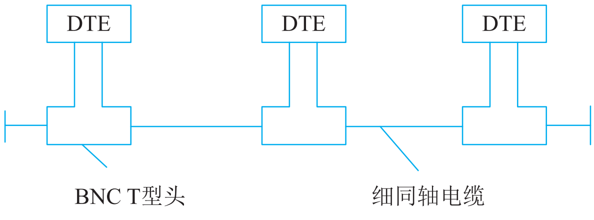


图 3-17　10Base 2 的配置