高等学校电子信息学科“十三五”规划教材·计算机类

计算机组网及Wireshark实验教程

徐 建 编著

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

高等学校电子信息学科“十三五”规划教材·计算机类

计算机组网及 Wireshark 实验教程

徐　建　编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是计算机网络课程的配套实验教材，同时也包含了进行实验所需的基础知识，因此可以单独使用。

全书共分为四个部分。第 1 部分是局域网的构建，在学习完基本概念后，还安排了网络配置及常用命令、网线的制作，交换机的基本配置、交换机 VLAN 的配置和生成树的配置管理等实验。第 2 部分是网络的互联，安排了静态路由、RIP、OSPF、NAT、ACL 和 DHCP 配置管理等实验。第 3 部分是网络的应用，安排了 BIND 服务器、Web 服务器的安装配置和简单的 TCP 客户机和服务器编程等实验。第 4 部分介绍了网络中流动的数据包，安排了 802.11、ARP、NAT、DHCP、DNS、TCP、HTTP 和 ICMP 等多个 Wireshark 数据包捕获实验。附录部分介绍了两个工具软件 Cisco Packet Tracer 和 Wireshark 的基本使用方法，还提供了部分实验中不同厂家交换机和路由器产品所使用命令的一些区别。

本书可以作为计算机科学与技术等信息类专业学生的实验指导书。一般工科专业的大二学生，在学习完高级程序设计语言、对计算机有基本认识之后，也可以选择这本书作为进一步学习计算机网络的教材。

图书在版编目(CIP)数据

计算机组网及 Wireshark 实验教程/徐建编著. —西安：西安电子科技大学出版社，2018.12
ISBN 978-7-5606-5121-7

Ⅰ. ① 计… Ⅱ. ① 徐… Ⅲ. ① 计算机网络—通信协议—教材 Ⅳ. ① TN915.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 249570 号

策划编辑 陈 婷
责任编辑 郑一锋 陈 婷
出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)
电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071
网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com
经 销 新华书店
印刷单位 陕西利达印务有限责任公司
版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17
字 数 397 千字
印 数 1～3000 册
定 价 38.00 元
ISBN 978-7-5606-5121-7/TN

XDUP 5423001-1

前　言

这是一本通过计算机组网实验学习 TCP/IP 协议的书。

以往的教科书大都按照协议层次自顶向下或者自底向上的方式讲述 TCP/IP 协议的原理和实现。本书从计算机组网的角度出发，先简单介绍相关的基本概念，然后说明如何具体构建一个计算机网络，最后深入到网络中流动的数据内部，观察各种数据传输单元的具体表现形式，从而达到学习和理解计算机网络原理的目的。

如果读者有一定的计算机基础知识，已经知道计算机是由 CPU、内存/外存、输入/输出等部件构成，也了解操作系统、应用程序这些概念，并且学习过 C 语言高级程序设计，有一定的编程经验，那么肯定能够顺利地学习本书，并且完成书里介绍的所有实验项目。在读完本书并且完成书中所有实验以后，你会对计算机网络原理有比较深刻的理解。如果你的理想是成为一名网络工程师，或者从事计算机相关的工作，那么通过本书学习到的网络知识和积累的经验，将对你未来的职业生涯产生积极的影响。

本书非常适合作为一般工科专业的大二学生在学习完高级程序设计语言、对计算机有基本认识之后，进一步学习计算机网络的教材。而对于计算机专业的学生来说，它是一本很好的实验指导书，能够帮助学生巩固在计算机网络理论课程学习中接触到的专业知识。

本书共分为四个部分。

第 1 部分是局域网的构建。

这部分首先介绍了一些有关网络的基本术语，例如局域网和广域网，接着引出了以太网的概念。以太网是事实上的局域网标准，在简单地描述了这个标准之后，还介绍了以太网交换机和以太网地址以及虚拟局域网。

在实验部分安排了网络配置及常用命令、网线的制作、交换机的基本配置、交换机 VLAN 和生成树配置等实验。通过这部分的学习，大家可以熟悉网络设备的基本配置和管理，从而具备构建一个局域网的能力。

第 2 部分是网络的互联。

这部分首先介绍了局域网互联的关键设备——路由器的基本结构和功能，然后介绍了子网、IP 地址的分配和 Internet 的层次路由架构等内容，最后介绍了内网和外网的区别。

在实验部分安排了静态路由的配置，RIP 和 OSPF 的配置，NAT、ACL 和 DHCP 配置管理等实验。在完成这部分内容的学习后，读者将会熟悉路由器的基本配置，能够互联不同的计算机局域网，从而具备构建一个广域网的能力。

第 3 部分是网络的应用。

网络应用是网络存在的意义。这部分首先介绍了网络应用的不同结构形式和操作系统提供给网络应用的两种基本传输服务，然后介绍分别采用这两种基本传输服务的典型应用：DNS 和 Web 服务，同时也介绍了基本的 Socket 编程，让大家能够了解网络应用的具体工作方式。

在实验部分安排了 BIND 服务器、Web 服务器的安装配置和简单的 TCP 客户机和服务

器编程等实验。

第 4 部分是网络中数据包的流动。

这部分首先介绍了网络的基本层次，更确切地说是操作系统中各种软硬件模块在网络通信过程中扮演的角色，然后介绍 Internet 中数据的流动，最后通过一个无线上网的例子，介绍了各种协议在数据包流动过程中的作用。

在这部分将利用 Wireshark 工具深入到数据流内部观察数据传输单元具体的组织形式，让读者理解各个协议的工作方式。实验部分安排了 802.11、DHCP、ARP、NAT、DNS、TCP、HTTP 和 ICMP 等多个 Wireshark 数据包捕获实验，帮助读者理解协议的具体工作方式和数据流的内部组织形式。

在附录部分介绍了本书涉及的两个工具软件 Cisco Packet Tracer 和 Wireshark 的基本使用方法，也介绍了部分实验中不同厂家交换机和路由器产品所使用命令的一些区别。

如果大家在学习完本书后有所收获，那会使作者感到无比欣慰。欢迎大家提出宝贵意见和建议，并通过邮件发送到 jian.xu@hdu.edu.cn 与我们联系。谢谢大家！

徐建

2018 年 4 月

致　　谢

我之所以能够完成这本书的编写，要感谢很多人。

首先是我所有的老师，特别是西南大学的武伟、刘洪斌、刘秉刚、杨国才、余建桥，浙江大学的李善平和香港浸会大学的徐建良老师。

然后是我的同事们——杭州电子科技大学的董云耀、王相林、徐明、徐向华、姜明、章红娟老师。

还有我实验室的同学们——占观华、黄志锋、邵云帆。

最后还有我的家人。

感谢大家对我一直以来的关心和帮助！

阅 读 指 南

如果大家是刚开始学习计算机网络，那么建议从第 1 部分开始并按书中章节顺序阅读学习。如果你对计算机网络已有一定了解，那么你可以浏览已了解的内容并复习其要点，然后按照自己的计划开始学习。

在本书的第 1 和第 2 部分使用了大量例子来说明配置命令的使用。附录 A 简单介绍了 Cisco Packet Tracer 模拟器的使用方法，大家可以在模拟器上试用这些实例。大部分交换机和路由器都有相类似的功能命令，如果使用一个定制的实验环境，例如华为或锐捷公司的实验环境，读者有可能会发现本书所讲与读者平时面对的系统之间有所不同，包括一些屏幕显示或命令序列，这时就需要参阅相应公司的产品手册。但大部分情况下设备调试的过程是类似的。

本书在第 3 部分使用了两个软件 BIND 和 Apache HTTPD Server 来帮助大家理解 DNS、Web 服务。第 4 部分介绍了如何使用 Wireshark 数据包捕获工具对数据流进行观察。这些软件都是免费的，大家可以按照书中的方法在计算机上进行安装和使用。

本书使用不同的提示符和文字来区别不同的内容，列出概念或命令的某些特征或表示当前所采取的动作。

本书主要使用以下两种说明方式：

实例：
- 演示命令在系统中的功能
- 希望大家在自己的系统上练习使用命令

注意：
- 常见的用户错误
- 警告该操作可能发生的后果

印刷符号说明

本书使用特殊字体来强调某些词语。例如用黑体表示用户从键盘输入的命令或特殊字符。

在说明一个命令序列实例时，命令右侧“～”后面的文字是对其所执行操作或提示信息的注释。

下面是一些终端显示实例和命令，它们是大家在练习对设备进行配置时屏幕上经常看到的系统提示和使用的命令。

```
PC>ping localhost                    ～ping 某台主机以测试链路连通性
C:\WINDOWS\System32>                 ～真实主机的命令行执行窗口

Switch>enable                        ～进入特权模式
```

```
Switch#configure terminal                                    ～进入配置模式
Enter configuration commands, one per line.  End with CNTL/Z.  ～系统提示
Switch(config)#                                              ～配置模式提示符

Router>enable
Router#
```

输入约定

用户键入的字符命令最后一般需要输入回车键，在各个例子中不再特别提示。用户需要输入不可见字符，例如 TAB 指标符时，本书中使用<tab>提示。

目　录

第 1 部分　局域网的构建

在学习本部分内容之前，了解一些关于 TCP/IP(Transmission Control Protocol / Internet Protocol)网络的基本知识是很有必要的。

TCP/IP 协议是 Internet 的基础，没有 TCP/IP 协议就没有 Internet 的今天。网络协议约定了网络中数据的发送、接收以及数据本身组织(数据流是如何划分成分组或者数据包，以及分组格式)的一些规范。如同人与人之间相互交流需要遵循一定的规矩一样，计算机之间的相互通信也需要遵守共同的规则，这些规则就称为网络协议。

在 TCP/IP 网络中协议被分成了许多层次。它们是应用层、传输层、网络层、链路层和物理层。应用层主要指应用程序；传输层主要为两台主机上的应用程序提供端到端的通信，把网络层的通信复用为应用程序之间的通信；网络层负责两台主机之间的通信，处理数据包(IP 数据报)在网络中的流动；链路层有时也称作数据链路层或网络接口层，负责处理通信相关的具体细节问题。

在通信的时候，网络中的数据流划分为分组或者数据包这样的数据传输单元进行传输。因此本书使用分组或者数据包统称各个协议模块之间交换的数据传输单元。在 TCP/IP 网络中进行通信的两台主机至少各需要一个 IP 地址。一般用数据报(datagram)特指网络层协议模块交换的数据传输单元，它携带了源主机和目的地主机的 IP 地址；用链路层帧(frame)或者帧特指链路层协议模块交换的数据传输单元。本部分将要介绍的交换机和网络适配器(网卡)之间交换的数据传输单元就是链路层帧。

大家可能做不到一下子理解所有的协议层次以及它们的含义。但是在这一部分你需要了解一些基本知识，那就是网络中大部分的通信内容来自于应用层，也就是应用程序，接着交给计算机的操作系统，然后是网卡，最后通过通信链路，例如网线传输到网络中，再经由交换机发送到目的主机。如果目的主机和源主机在同一个网络中，源主机就将数据直接交付过去；如果目的主机和源主机不在同一个网络中，那么在下一部分会学习到，数据会经由网关代为转发，最后交付到目的主机。

很多书上经常提到的网络协议层次其实不是真正的堆栈状层次结构，而是一种逻辑上的描述。确切地说，这种所谓的层次结构是数据传输处理流程中的一种顺序关系，如图 1-1 所示。各个协议层次的实体存在，也就是各个协议层次具体实现的软件模块，例如应用程序、操作系统中的传输层模块和网络层模块、链路层实现的硬件模块(例如网卡)，它们之间的关系本质上是应用程序编程接口(Application Programming Interface，API)的调用关系，通俗地说就是函数调用关系。应用程序调用发送函数，以参数的形式把要发送的数据交付给操作系统提供的发送函数然后发送出去。同样，应用程序是以接收函数调用的方式，把

数据接收回来。

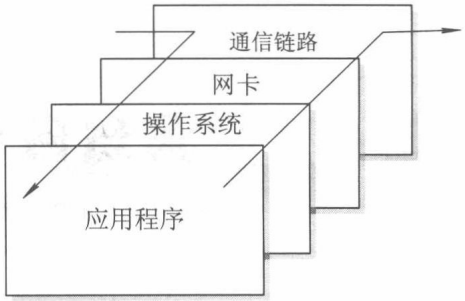

图 1-1　网络数据在主机内的流动

数据从应用程序出发，经过计算机的操作系统来到网卡，通过交换机到达目的主机。多个主机和交换机连接构成了一个局域网。在本部分将学习关于局域网的一些基本知识，包括事实上的局域网标准——以太网，以及以太网交换机、局域网主机的编址和虚拟局域网。通过本部分内容的学习，大家可以较好地理解数据流经局域网的基本过程。在完成本部分的实验后，大家将具备构建一个局域网的能力。

1.1 基础知识

1.1.1 局域网

局域网(Local Area Network，LAN)是指在某一区域内由多台计算机互联而成的计算机网络。“某一区域”可以是同一办公室、同一栋建筑物、同一个公司或者同一个学校等，范围一般在几千米以内。在同一局域网内的计算机可以方便地实现文件、应用软件、打印机、扫描仪等资源和设备的共享功能。

局域网其实是相对于广域网而言的，是从地域范围角度对计算机网络的一种分类。**广域网**(Wide Area Network，WAN)是一种跨越更大地域范围的计算机网络，通常跨越省、市甚至一个国家。现在一般会把 Internet 指称广域网，因为 Internet 是一个世界范围内的互联了无数台计算机的网络。

大部分人家里都会使用无线路由器上网。仔细观察家里的无线路由器，会发现路由器的背面有许多端口，如图 1-2 所示，但是一般其中一个端口会标注成 WAN 口(有的路由器是 Internet 口)和另外四个 LAN 口(有的路由器标注的是 1、2、3、4)。

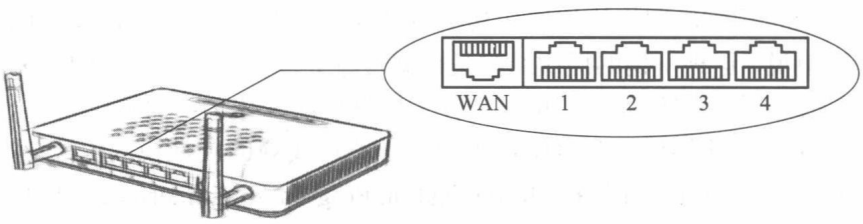

图 1-2　家用路由器的 WAN 和 LAN 口

路由器上的 WAN 口就是用来连接外网(Internet)，或者说是连接宽带运营商的接入设备的。例如电话线上网时 WAN 口用来连接 ADSL Modem(调制解调器)；光纤上网时 WAN 口用来连接光猫；普通的网线(双绞线)入户上网时，WAN 口用来连接入户网线。而路由器上的 LAN 口(1、2、3、4)，用来连接内网(局域网)中的设备。所以大家家里的路由器构建了一个局域网，同时这个局域网通过一个接口——WAN 口连接到了广域网(Internet)。家用的路由器如果有无线上网的功能，那么它还会帮我们构建一个无线局域网络，这时它就叫做无线路由器。

局域网的拓扑结构通常有总线型、环型、星型和树型。

1．总线型结构局域网

总线型结构局域网中的各个计算设备都与一条总线相连，这个网络中所有的计算设备都通过总线进行信息传输。最早作为总线的通信线缆是同轴电缆和双绞线。许多电视机后面插的那条圆形的信号线就是同轴电缆，而通常所说的网线就是双绞线。在总线型结构中，总线的传输是有速度限制的，或者叫带宽限制，它由介质(线缆)本身的物理性质和介质访问控制协议所决定。由于总线型结构网络中计算设备共享总线的带宽，因此它能支持的设备个数是有限制的。一般使用总线型结构的局域网是一种广播网络，即传输的数据会被传送到与该总线连接的所有计算设备并被它们接收处理。总线型结构网络简单、设备投入少、成本低、安装使用方便，但是当某个主机节点出现故障时，故障的排除比较困难。

总线型局域网的一个例子是共享式以太网，本书将在下一节进行简单的介绍。这种类型的计算机网络在现实生活中已经不太常见了，但是在工业控制领域却得到了越来越广泛的应用。例如 EtherCAT(以太网控制自动化技术)是一个以以太网为基础的开放架构现场总线型系统，它在实施时就经常被部署成总线型结构。

在一些技术资料中通常使用类似图 1-3 中的总线型局域网来表示一个典型的局域网，但是现在大部分情况下人们使用的局域网其实是使用交换机构建的星型网络。

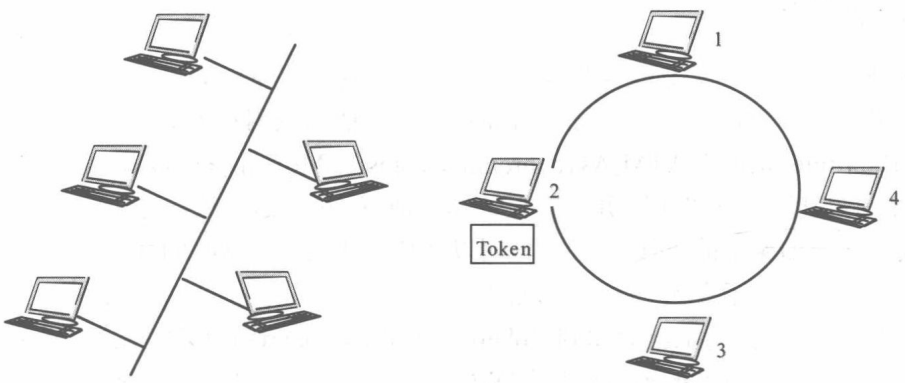

图 1-3　总线型和环型结构局域网

2．环型结构局域网

在环型结构的网络中各计算设备通过一条首尾相接的通信链路连接起来。它是一个闭合的环型结构网络。环型结构网络系统中各个节点地位相等，网络结构也比较简单。

令牌环网络是环型结构局域网的一个例子。在这种网络中没有主节点。一个称为令牌(Token)的特殊帧(帧是局域网中数据传输的单元)在节点之间以某种固定的次序进行传递。

例如图 1-3 中的节点 1 可能把令牌传递给节点 2，节点 2 总是把令牌传递给节点 3，而节点 4 总是把令牌传递给节点 1。当一个节点收到令牌时，如果它刚好有数据要发送，它就持有这个令牌，然后发送它自己的数据，否则它立即向下一个节点转发该令牌。令牌传递是分散的，有很高的效率，但是它也面临一些问题。例如，一个节点的故障可能会使整个环型结构崩溃；若一个节点偶然忘记释放令牌，那么其他节点就必须调用某种恢复算法使令牌返回到循环中来。令牌环网络在局域网发展的初期曾经占有一定的市场，典型的产品如 IBM 公司的令牌环网络(Token-ring network)，但现在这种网络技术已经成为历史了。

3．星型结构局域网

在这种结构的网络中各计算设备以星型方式连接。网络中的每一个计算设备都以中央节点为中心，通过连接线与中心节点相连。如果一个计算设备需要传输数据，那么它必须通过中心节点进行转发。

使用局域网交换机构建的网络就是一种星型结构局域网。交换机就是一种常见的中央节点。但是说交换机是中央节点其实是不妥当的，因为交换机对于接入设备来说是透明的，在数据转发过程中，连接的计算设备并不会感到它的存在。在稍后的章节会比较详细地介绍交换机及其配置使用的方法。

4．树型结构局域网

树型结构网络是一种分级结构网络，又称为分级的集中式网络。其特点是网络构建成本低、结构比较简单。在树型结构网络中，每个链路都支持双向传输，并且网络中的节点扩充方便、灵活。但在树型结构网络中任意两个节点之间不能产生回路。

树型结构网络的一个缺点是在这种结构的网络系统中除叶节点及其相连的链路外，任何一个非叶节点或链路产生的故障都会影响整个网络系统的正常运行。

使用多台局域网交换机级联而成的网络可以认为是一种树型结构的局域网。

1.1.2 以太网技术

以太网是有线局域网市场事实上的工业标准，是到目前为止最为成功的有线局域网技术。在 20 世纪 80 年代，以太网虽然面临着来自其他局域网技术如令牌环、FDDI(Fiber Distributed Data Interface)和 ATM(Asynchronous Transfer Mode)的挑战，但是自从以太网发明以来，它就在不断演化和发展，并一直保持领先地位。可以这么说，正是由于位于 Internet 边缘的以太网，例如家里的无线/有线局域网以及位于 Internet 核心的数以百万计数据交换中心的高速以太网构成了今天庞大的互联网。

提到以太网的发明，马上就会想到 Robert Metcalfe。Robert 在 1979 年离开施乐(Xerox)，成立了 3Com 公司，并和 Xerox、Intel 及 DEC 公司联合开发了基带局域网规范。这些规范形成了 10Base 以太网标准，这个标准包括以太网适配器与外部收发器的接口电缆规范。

最早的以太网使用同轴电缆作为总线来互连节点，所以是一种共享式以太网。两个不同联网设备在同时发送数据时会发生碰撞，需要多路访问协议来规范它们在共享广播信道上的传输行为。载波侦听多路访问和碰撞检测协议(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection，CSMA/CD)就是一种常见的多路访问协议。

CSMA/CD 遵循两个重要的原则：

① 发送数据之前先侦听。如果有其他联网设备正在发送数据，那么要等到它们发送结束。用计算机网络的术语来说，这被称为载波侦听(Carrier Sense)，即一个节点在传输数据前先侦听信道；如果来自另一个节点的数据正在信道上传输，节点则等待一段随机长度的时间，然后再开始侦听信道；如果侦听到该信道空闲，该节点则开始数据传输，否则该节点等待另一段随机时间，继续重复这个过程。

② 一个节点如果与其他设备同时开始传输，检测到冲突后马上停止发送剩余的数据。这被称为碰撞检测(Collision Detection)，即一个传输节点在传输时其实一直在侦听信道，如果它检测到另一个节点也正在传输数据，它就停止发送，并用指数回退算法来确定它应该在什么时候尝试下一次传输。

在 20 世纪 90 年代以太网经历了一次变革。连接网络的共享总线被一个称为集线器的设备所取代，从而变成了星型结构。集线器“Hub”是“中心”的意思。集线器的主要功能是对接收到的信号进行再生整形放大，以增加网络的传输距离，同时把所有联网计算设备集中在以它为中心的一个区域。它工作于网络的物理层，是一个纯硬件的物理层设备。集线器与网卡、网线等传输介质一样，属于局域网中的基础设备。它的每个端口仅仅是简单地收发比特(Bit)，收到 1 就转发 1，收到 0 就转发 0，而不进行碰撞检测。碰撞检测是由联网计算设备自身完成的。集线器的外形与后面介绍的交换机类似，但是进入 21 世纪后就很少使用了。

在 20 世纪 90 年代后期，以太网继续使用星型拓扑结构，但是位于中心的集线器慢慢地被以太网交换机取代了。

以太网的成功有很多原因。首先，以太网是第一个广泛部署的高速局域网。因为它出现得早，技术人员非常熟悉。而当其他局域网技术问世时，人们就不容易接受了。其次，令牌环、FDDI 和 ATM 比以太网复杂并且价格昂贵。第三，以太网总是在不断进步，开发人员不断推出具有更高传输速率的产品。在 20 世纪 90 年代出现了交换式以太网，进一步提高了它的有效传输效率，同时加快了它的发展速度。最后，由于以太网市场的成功，以太网硬件尤其是网卡或者适配器成为了普通商品而变得极为便宜。现在已经很少看到网卡这种设备单独出现了，因为网卡上原有的网络适配器芯片全都集成到了计算机的主板上，成了联网设备的一个标准配置。

以太网在不断发展的过程中，从共享式以太网到 Hub 的发明，再到交换式以太网，有一个历经 40 年保持不变的东西，那就是以太网帧的数据结构。也许这才是以太网经过那么多年的发展，还叫以太网的真正原因。

一个以太网的数据传输单元叫**以太网帧**，它是链路层的数据传输单元。它的结构如图 1-4 所示。通过观察以太网帧，能够了解许多有关以太网的知识。在本书的第 4 部分，将详细介绍如何捕获并观察网络上传输数据单元的组成结构，其中当然也包括以太网帧。

前同步码	目的地址	源地址	类型	数据(载荷)	CRC

图 1-4　以太网帧结构

设想这样一个环境，有一台主机向另一台主机发送一个 IP 数据报(网络层的数据传输

单元)，且这两台主机位于同一个以太网。假设发送适配器(即适配器 A)的 MAC 地址是 AA-AA-AA-AA-AA-AA(MAC 地址就是物理地址或者以太网地址，下一节将介绍以太网的编址)，接收适配器(即适配器 B)的 MAC 地址是 BB-BB-BB-BB-BB-BB。发送适配器一般会在一个以太网帧中封装一个 IP 数据报，并把该帧传递到物理层，也就是发送到网络链接上。接收适配器从物理层收到这个帧，提取出 IP 数据报，并将该 IP 数据报交付给网络层。

以太网帧包括 6 个字段。

1) 前同步码(Preamble)

以太网帧以一个 8 字节的前同步码字段开始。该前同步码前 7 个字节的值是 10101010，最后一个字节是 10101011。前同步码字段的前 7 个字节用于“唤醒”接收适配器，并且将它们的时钟和发送方的时钟同步。需要同步信号的原因是适配器 A 上的时钟脉冲和适配器 B 上时钟脉冲存在不一致性，因为适配器时钟可能有一些漂移，而且这种漂移的范围也不能事先预知。但是随着半导体制造技术的发展，已经可以将这种漂移控制在一个可以接受的范围。因此接收适配器 B 只需通过锁定前同步码前 7 个字节的比特，就可以锁定适配器 A 的时钟频率。前同步码第 8 个字节的最后两个比特(第一次出现的两个连续 1)用于提醒适配器 B 接下来马上要开始传输数据了。

2) 目的地址(Destination Address)

这个字段包含目的适配器的 MAC(Media Access Control)地址，即 BB-BB-BB-BB-BB-BB。当适配器 B 收到一个以太网帧，如果这个帧的目的地址是适配器 B 的 MAC 地址 BB-BB-BB-BB-BB-BB，就将该帧的数据字段内容提取出来交付给网络层；如果收到一个帧其目的地址不是适配器 B 的 MAC 地址，就丢弃该帧数据。

3) 源地址(Source Address)

这个字段包含了发送该帧的适配器的 MAC 地址，指明了帧的发送者，在这里是 AA-AA-AA-AA-AA-AA。

4) 类型字段(Type)

该类型字段指明该以太网帧承载的网络层数据传输单元使用的协议。以太网帧承载的不一定都是 IP 数据报，也可以是其他类型的数据。例如工业控制领域现在也使用以太网技术，前面提到的 EtherCAT 协议就将其报文封装在以太网帧里在联网设备之间进行数据通信。其他的计算机网络，例如 20 世纪 90 年代流行的 Novell 网络也可以在以太网基础上实施。

事实上一台给定的主机可以支持多种网络层协议，来适应不同应用的数据传输需求。现在的 Windows 操作系统，如果打开它的网络配置界面，可以看到它支持 IPv4 的同时也支持 IPv6 协议。显然 IPv4 和 IPv6 就是两个不同的网络层协议。因此当以太网帧到达适配器 B 时，适配器 B 需要决定应该将数据字段封装的内容传递给哪个网络层协议模块进行处理。每个网络层协议都有自己的类型编号，这个编号都在相应的 RFC 文档(Request For Comments，RFC 文档记载着网络协议的具体规定)里面定义。例如 IPv4 协议的类型编号被定义为 0x0800。这个字段的作用就是为了把链路层协议与网络层的一个具体协议对应起来。这是一个非常重要的概念。

5) 数据字段(Data)

这个字段一般承载的是 IP 数据报。以太网的最大传输单元(Maximum Transmission Unit，MTU)是 1500 字节，这意味着如果一个 IP 数据报的长度超过了 1500 字节，那么该数据报发送进入一个以太网之前，主机必须将这个数据报分片。数据字段的最小长度是 46 字节。如果 IP 数据报少于 46 字节，数据报必须被填充至 46 字节。当有填充数据时，传递到网络层的数据包括原始的 IP 数据报和填充的数据。网络层协议可以使用 IP 数据报首部中的长度字段来移去填充数据。

6) 循环冗余校验码(Cyclic Redundancy Check, CRC)

循环冗余校验码是一种根据网络数据或文件内容进行函数散列而产生的固定位数校验码。这种校验码主要用来检测或校验数据传输、保存后可能出现的错误。它是利用除法及余数的原理来进行错误检测和纠正的。设置 CRC 字段的目的是使得接收适配器(适配器 B)能够判断所接收的帧中是否引入了差错。例如由于传输过程中的信号衰减和电磁干扰，会导致数据传输过程中的比特位发生翻转，从而引入差错。当源主机构造以太网帧时，它会计算生成 CRC 字段，并附加到所传输帧的尾部。当目的主机接收该帧时，它对该帧运用同样的算法进行计算，并核对所得的结果与 CRC 字段的内容是否相一致。这个操作称为循环冗余校验。如果校验失败，即两次计算的结果不相等，则目的主机就知道接收到的帧在传输过程中出现了差错。

以太网技术实现的链路层通信向网络层提供的是不可靠服务。目的主机适配器收到一个来自源主机适配器的帧后，即使这个帧通过 CRC 校验并提取出数据交付给网络层了，目的主机也不向发送方发送确认。而当这个帧没有通过 CRC 校验时，目的主机也同样不向发送方发送信息说自己没有收到正确的帧。当一个帧没有通过 CRC 校验，目的主机适配器只是简单地丢弃该帧。因此，源主机根本不知道它传输的帧是否到达了目的地并通过了 CRC 校验。但这种机制也有它的好处，它使得以太网协议的实现变得简单，硬件成本更低廉。

以太网技术的标准是由国际电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers，IEEE)制定的。IEEE 802.3 标准定义了关于以太网物理层的连线、信号和介质访问控制协议等规范。自 100M 以太网在 20 世纪末的快速发展后，千兆以太网甚至 10G 以太网正在国际组织和企业的推动下不断拓展它们的应用范围。

常见的 802.3 标准有：

10M:10base-T(Unshielded Twisted Paired，UTP)

100M:100base-TX(UTP)，100base-FX(光纤)

1000M:1000base-T(UTP)，1000Base-SX(光纤)，1000Base-LX(光纤)

在 IEEE 802.3 标准中为不同的传输介质制定了不同的物理层规范。在这些标准中前面的数字表示传输速度，单位是“Mb/s”，Base 表示“基带传输”的意思，最后的一个字符表示传输介质的类型。

1.1.3　链路层的编址

每个节点或者联网的计算设备都有 MAC 地址。但是为什么在网络层和链路层都需要地址呢?