IP路由原理与技术

张宏科 编著

清华大学出版社
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书对 IP 路由原理与技术作了全面的叙述,在介绍 IP 网络基本概念、特点、组成、结构及国内外发展动态与趋势等问题的基础上,主要叙述了 IP 路由原理、实现技术、路由协议及很有实用价值的 IP 网络设计与工程等问题。

全书取材新颖、内容丰富、实用性强,反映了国内外 IP 路由技术的现状,适合于通信、计算机技术开发与研究的工程技术人员阅读,也可供大专院校通信、计算机等专业的师生和相关培训班作为教材或教学参考书。

书　　名: IP 路由原理与技术
作　　者: 张宏科
出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编:100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn
责任编辑: 胡先福
印 刷 者: 世界知识印刷厂
发 行 者: 新华书店总店北京科技发行所
开　　本: 787 × 1092 1/16　**印张**: 10.25　**字数**: 241 千字
版　　次: 2000 年 10 月第 1 版　　2000 年 10 月第 1 次印刷
书　　号: ISBN 7-302-01077-3/TP·403
印　　数: 0001 ~ 5000
定　　价: 20.00 元

前　言

随着科学技术的发展，信息已成为推动社会向前发展的巨大资源。在未来21世纪中，信息领域的竞争将是世界经济竞争的焦点，而信息领域的竞争不仅取决于信息技术的掌握，更取决于一个信息网络的建设及其应用水平，特别是IP技术作为21世纪网络的主要技术，将发挥着越来越重要的作用。掌握IP技术不仅仅是能够使用IP网络，更主要的是还需要掌握IP网络的有关技术，了解新一代IP网络的发展趋势。

目前，尽管IP网络的建设与应用比较广泛，但多数仅局限于使用或运用，至于IP网络究竟是怎样工作的，采用了哪些主要和关键技术，尤其是对于IP网络的核心部件路由器的技术与协议方面，还缺乏系统、全面的介绍。

为了推动国内IP网络技术的发展，跟踪世界新一代网络先进技术，满足广大工程技术人员、科学研究人员的需要，我们在多年学习、研究与工作实践的基础上编著了本书，重点是针对新一代IP网络的主要和关键技术(IP路由技术)，作为在IP路由器原理与技术方面的一本书籍尽量比较全面、系统地介绍给广大读者。主要内容包括：第1章为使读者对IP网络有个基本了解，首先介绍IP网络的基本概念、特点、组成、结构及国内外发展动态与趋势等问题。第2章主要介绍最新IP网络的核心部件路由器原理与技术，包括路由原理、功能、组成和实现等问题，从而使读者对路由器技术有个深入的了解。第3章重点叙述了各种IP路由协议，包括RIP、OSPF、BGP以及IPv4和IPv6等协议，从而使读者获得较全面的IP路由技术知识(如设计、使用与工程实现等技术)。第4章主要介绍IP网络的设计与工程，读者从中可以获得比较全面的系统知识，并能指导IP网络的研究工作与网络工程的设计等。第5章展望了IP网络的发展趋势。

本书在编写过程中得到了北方交通大学、总参第54研究所等单位的支持和帮助，以及“IP核心路由器研究与开发”科学基金项目的资助，在此谨向他们表示谢意。此外，还得到简水生院士、袁保宗教授、谈振辉教授、宁滨教授、张思东教授、冯玉珉教授、罗四维教授、阮秋琦教授、卜长坤教授、韩臻副教授、张有根副教授和总参第54研究所龚碧秀工程师以及研究生彭雪海、卢小青、刘春宁、张沛、李洪杰、刘晓璇、商超和赵耀峰等的大力帮助和支持，在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于计算机和通信技术发展极为迅速，IP路由技术仍在发展与完善之中，加之编写时间有限，书中难免会有不妥之处，敬请广大读者指正。

张宏科

2000年7月

目　　录

第1章 概 述

1.1 引言

随着信息网络技术的发展,对网络技术的掌握和应用已日益受到人们的重视。特别是在21世纪中,信息网络无疑将成为信息社会的主要传播媒体和推动社会向前发展的巨大动力,发挥越来越重要的作用。

现在,IP(Internet Protocol)网络作为一种最有发展前景的网络技术,已广泛应用于整个社会,并起着十分重要的作用。但对于大多数人来说,IP究竟能做什么?它是如何工作的?它的各部分之间是怎样相互作用的?这些问题并不是每个人都能说清楚、讲明白的。虽然有很多书籍介绍了许多有关IP网络的知识,但它们大量讨论的还只是网络的使用和应用,以及如何创建时髦的网站等。

本书为了使读者对IP网络有一个基本、全面的了解,在介绍IP网络的基本概念、特点、组成、结构及发展趋势等问题的基础上,主要讨论了IP网络的核心部件、路由器技术与原理、IP路由协议以及IP网络的编址与设计等,从而使读者能够较为全面、深入地获得IP网络系统的有关知识,并能指导IP网络的工程建设、设计与研究工作。

1.2 IP网络的基本概念

何谓IP?IP实质上是计算机网络用于交换信息的基本包(Packet)格式。那么,什么是IP包呢?IP包是一种事先定义好的格式,通常由一个包头(Header)和随后的一些数据组成,这里数据可以是部分文件、终端应用程序和一段E-mail消息等。在IP网络上,所有的信息都将被划分为独立的IP包,每个IP包可以沿自己的路径通过网络传输。

包交换(有时也称为分组交换)是在60年代发展起来的,当时主要应用于军事应用程序环境下的通信基础设施。由于将信息流划分为包,所以可避免网络的某些部分负荷太重。在"分组交换"的协议中,用于通信的计算机把它们的数据划分为分组,也就是包、然后将这些分组通过"分组交换网络"传输。分组交换的技术有很多,如X.25、异步传输方式(Asynchronous Transfer Mode,ATM)、帧中继(Frame Relay,FR)和IP等。本书将重点讨论IP路由技术与协议,因为IP路由技术作为Internet主要技术得到了广泛的应用,并且日益成为趋势。

IP允许数据流过内部计算机网络,IP包所携带的数据既可以是传统的计算机数据,也可以是在IP上使用的数字化音频和视频流。处理之后的话音和视频流其实也就是数据。但是,与传统的数据传输(例如文件传输)不同,它们在传输上具有特殊的需求。因为

话音和视频流对时间十分敏感，并且对延迟的容忍也十分有限。奇怪的是，话音和视频流可以丢失一些数据而不会产生听觉或者视觉上的失真，但数据业务却必须保证传输的正确性，也就是说，需要花费时间来重传丢失或者损坏的数据包以保证整个传输完好无损。

在IP网络的早期，包交换设备通常称为“网关”，这可能是因为它们常常作为本地校园网和广域网之间网关的缘故，现在，这些设备在更多情况下被称为“路由器”，如图1.1所示。路由器可以在其任何接口上接收数据包，并通过不同的接口将数据包转发出去，将其发送到目的地。图1.1中的双向箭头用以指示数据包既可以从该接口进入路由器，也可以从该接口离开路由器，路由器是IP网络的基本和核心部件。

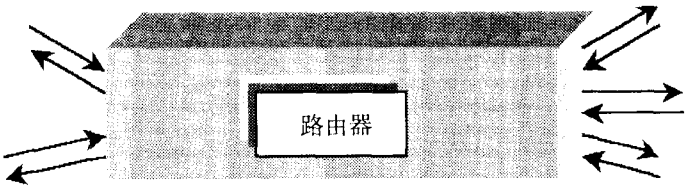

图1.1 路由器的基本功能

计算机在通信时为什么要进行“包交换”呢？为什么不在计算机之间建立一条临时的“电话呼叫”呢？这种差别主要来源于电话网的组建方式和计算机通信的基本特性。大多数计算机通信常常短暂，一般在秒的量级，而且经常是突发性的。用“突发性”这个词来描述这种情形最合适。我们不妨把它和话音通信做一下比较，话音通信通常会持续很长一段时间，在整个通信期间所使用的“带宽”数量却是可以预测出来的。一般的电话网都是为进行话音呼叫而设计的，而话音通信常常会持续一段较长（相对于其建立呼叫的时间）的时间，拨号和等待对方拿起电话的时间量级通常都在5秒左右。从电话网络角度来看，呼叫的建立是较为困难的，因为呼叫建立都是在前面这几秒钟内完成的，在呼叫建立之后，后面的通话将一直使用这些资源，这是由于在建立呼叫上的工作和维持一条已经建立好的呼叫，相比之下前者更为困难；而在话音呼叫中，通话的终止是由双方手工完成的，所以有史以来，电话业务对第一分钟的收费往往比后面的时间要贵一些。

数据通信的突发性与话音通信的非突发性之间存在很大的差异，话音呼叫的建立速度还受到人们使用手指进行拨号的限制，因为我们不可能拨的太快，使电话网的控制或者“信令”信道负担过重。而计算机可能需要在很短的时间之内向多个对等体（层）发送一段较短的数据比特，强行在每秒内建立多个连接，以实现多个对等计算机之间的“会话”。

一般说来，传统的包交换协议有两种基本类型，即“虚电路”和“数据包”。在虚电路中，在每个虚呼叫的开头仍然需要建立呼叫，但是所有先前建立起来的虚连接将共享同一条到包交换网的物理访问链路。这便消除了“电路交换”存在的多个连接需要多个物理线路的问题。对于包交换，所有的虚连接将共享同一条到包交换机的“物理线路”，而每个包都具有其自己的目标地址，该目标地址取决于在呼叫建立阶段所分配的虚电路。包交换机可很容易地据此通过简单地查表将该包转发到目的地。在包交换系统中，挂断就不成问题了，因为一个建立好的连接只不过是两台计算机之间的交换机内的一个表项而已。

但如果包交换机的内存有限，那么最好是拆掉那些不再需要的虚电路，以便为其他虚电路让出一些空间。建立虚电路所消耗的内存比起空闲电话呼叫所占用的带宽而言，代价要小的多。

“无连接”是包交换的另一种主要形式，IP 和许多其他网络层协议都属于这一范畴。在无连接模式中，并非在任何数据发送之前都明确地进行呼叫建立，而是让每个包都携带完整的目的地址。即只管将包发送到网络中，至于如何将包转发到它所指明的目的地.完全依赖于中间的每个包交换机，即 IP 路由器。

1.3　IP 网络的组成与结构

IP 是一种分层的协议，图 1.2 中给出了分层 IP 协议栈和 7 层开放系统互联参考模型的结构比较。4 层的 IP 参考模型和 7 层的 OSI(Open System Interconnect)参考模型是两种最重要的参考模型。在这两种模型中，每个层的功能都由一个以上的实体来执行。一个层中的实体与紧接着它的下一层中的实体直接互相作用，并为上一层提供服务。

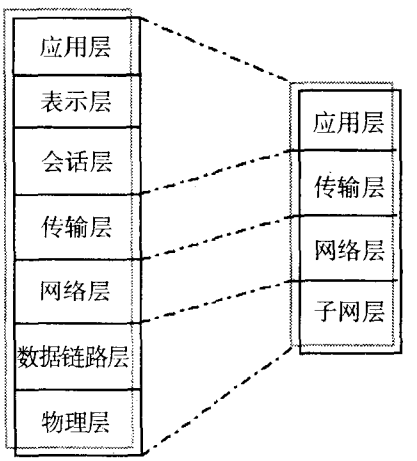

图 1.2　OSI 和 IP 模型比较

在 IP 协议栈中，传输层提供了两种十分常见的选择，即 TCP(Transmission Control Protocol)和 UDP(User Datagram Protocol)。前者是一种可靠的传输协议，而后者是一个更为基本的协议，只提供多个应用程序之间的“多路分用”。两个传输协议都把应用程序的数据认为是“不透明”的。换句话说，这些数据对传输层来说不具有任何意义。在传输层之下是 IP 层，IP 传送 TCP “片段” 或者 UDP “数据包”，也是把数据作为“不透明”数据进行处理，根本不知道 TCP 或者 UDP 的任何操作，更不知道它们所传送的应用程序的数据了。IP “包” 由 IP 头和高层传输数据 “协议” 组成。

在进行 IP 通信时，通常使用低层“子网”技术来完成相应的数据传输。这些子网技术，既有属于 LAN(Local Area Network)的子网(如 Ethernet、Token Ring、FDDI(Fiber Distributed

Data Interface)等)的,也有属于 WAN(Wide Area Network)的子网(如,静态和动态的点到点链路、X.25、FR(Frame Relay)、ATM、交换多兆位数据服务(SMDS)等)的。图 1.3 给出了可以运行 IP 的各种媒体介质使用路由器进行互联的示意图,为了使该图不至于太大,WAN "云" 路由器没有显示在远端站点中存在的 LAN。这些子网中的每个子网都具有各自的内部地址格式和帧格式。有些子网技术既有头字段也有尾字段,而有些只用一个头来封装 IP。每种技术都运行在单一的速度或者速度集之上,换句话说,它们之间完全不同。

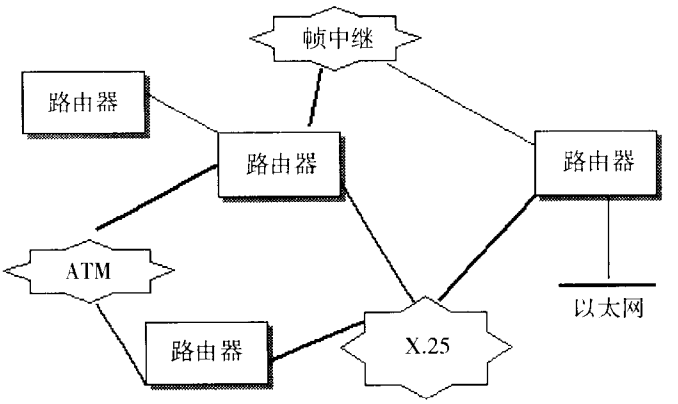

图 1.3 IP 运行于其他子网上的示意图

当一个路由器和另一个路由器或者端站(通常位于局域网或者 LAN 之上)进行通信时,需要以某种方式向其相邻节点发送数据包。一个包仅使用其 IP 地址是无法发送给其相邻节点的。IP 地址是高层地址,实际的操作是把 IP 包用特定的子网类型的帧格式封装起来,在该帧中包含有目标节点的地址,通常还包含有路由器的子网源地址。图 1.4 给出了 IP 协议栈中各层之间的关系以及封装的概念,这里可以用 TCP 代替 UDP,因为在分层的讨论中它们是相同的。

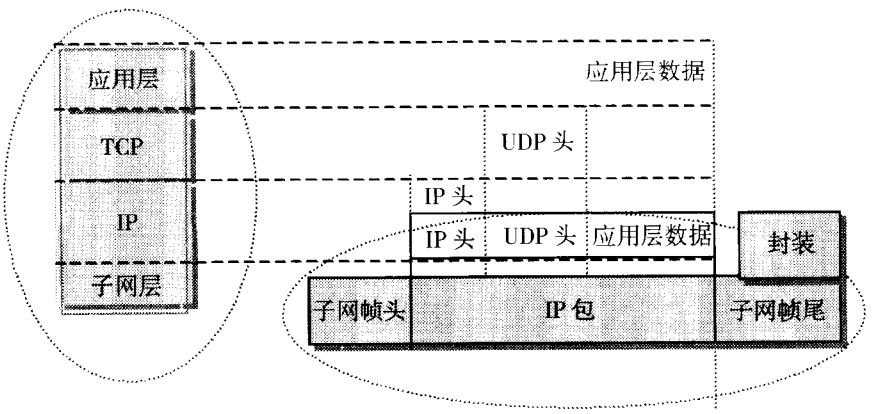

图 1.4 分层及封装

实际上,各种局域网和广域网都具有自己的编址方法、路由器在相互通信时必须使用

相应子网的地址。一般除了需要知道其相邻节点的 IP 地址外，路由器还需要知道其相邻节点的子网层地址。对于每种子网介质，IP 将使用不同的技术来获取其相邻节点的子网地址。在现实生活里，具有多层地址的系统随处可见，如地区、街道和门牌等都是多层地址的表现。

1.4　IP 网络的包格式

1.4.1　IPv4 包格式

IP 包是由 IP 头和高层传输数据“协议”组成的，如图 1.5 所示。它使 IP 层具有独特价值的一项重要功能，就是“子网无关性”，正是这项功能使得 IP 可以运行在几乎所有类型的子网之上。IP 向传输层屏蔽它所支持的众多子网和所有不同底层的特征。像是个网络层协议可以共享同一个子网层一样，也可以有多个传输层协议共享 IP 层，如图 1.6 所示，其中 ICMP 为 Internet 控制报文协议(Internet Control Message Protocol)。

图 1.5　IP 包格式

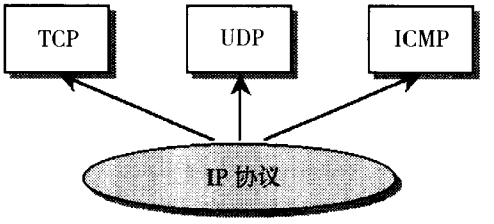

图 1.6　多个传输层协议共享 IP 层

图 1.7 中给出了 IP 包头的格式，IP 包头中的所有字段都十分有用。一般说来，包头除了多路分用和寻址功能之外还有其他许多功能。只要包头格式是图中 1.7 所示的这种简单格式，路由器就能认出并注意到目的地址。图中描述的是比特位的位置。包头的宽度为 4 个字节(32 比特)。

这里最为重要的字段，是我们熟悉的源地址和目的地址字段以及协议字段。其他的字段也很重要，后面将分别给予介绍。首先介绍总长度字段，该字段表示的是整个 IP 包(包括包头在内)的长度(使用的单位是字节)。由于该字段只有两个字节 16 个比特，所以 IP 包的最大长度可以达到 $2^{16}-1$ 即 65535 个字节。Internet 协议 RFC791 规定所有的 IP 端站必须能够发送和接收长度为 576 个字节的包。

图 1.7 IP 包头的结构

通常，IP 信息包头的典型长度为 20 个字节，另外还定义了一些可以追加在包头后面的“选项”。具体的追加可以借助于 Internet 包头长度(IHL, Internet Header Length)字段来实现，该字段存放的是 IP 包头中长度为 4 字节的“字”的个数。换句话说，确定 IHL 值的方法就是将 IP 包头的长度除以 4。为了避免出现小数，必须将 IP 包填充为 4 字节的整数倍，IHL 字段的典型长度是 5(即 20/4)。由于 IHL 的长度为 4 个比特，所以该字段的最大值为 15(即 $2^4 - 1$)。也就是说，IP 包头的最大可能长度为 60(即 15×4)个字节。版本字段的值为 4，这是因为使用的包头格式是 IPv4 格式，IPv4 是目前 Internet 所使用的 IP 版本。服务类型(ToS, Type of Service)字段最近在业界引起了较多的关注，因为 Internet 服务提供商(ISP, Internet Service Provider)和顾客强烈要求能够用某种方式在他们的网络内部提供不同的“服务类”级别。当前，“区分服务(DS, Differentiated Service)”的模型定义工作组正在进展之中。在该模型中，将 ToS 字段重新定义为 DS 字段。定义区分服务的两个 RFC 文档为 RFC2474 和 RFC2475，而 RFC2430 仅仅是说明如何对区分服务进行部署的一个例子。但是，随着这项新技术实践经验的累积，将有可能出现其他的方案。

实际上，IP 包选路时每通过一个路由器，生存时间(TTL, The Time to Live)字段的值就会减 1，利用这种机制可保证 IP 包不能永远存在于 Internet 中。TTL 的初始值最大为 255，但是端站可以使用比最大值小的 TTL 值。最初，TTL 的字面解释为 255 秒时间，这大概是因为在 80 年代初期的线路传输速度和基于软件的路由器条件下，接收并转发一个包的时间期望值为 1 秒。但是现在 TTL 已经演化为步跳计数器，除此之外，再没有其他的含义了。

每经过一次步跳都必须重新计算包头校验和的值，这是因为每次路由器步跳之后，TTL 的值都将减 1，包头随之发生变化，使得前一次步跳时计算的校验和变为无效值。如果执行了分段，IP 包头的内容将发生变化，因此也会强制进行校验和的重新计算。

1.4.2 IPv6 包格式

IPv6 包头格式如图 1.8 所示，仔细查看 IPv6 的包头字符，就可以更好地理解 IPv6。

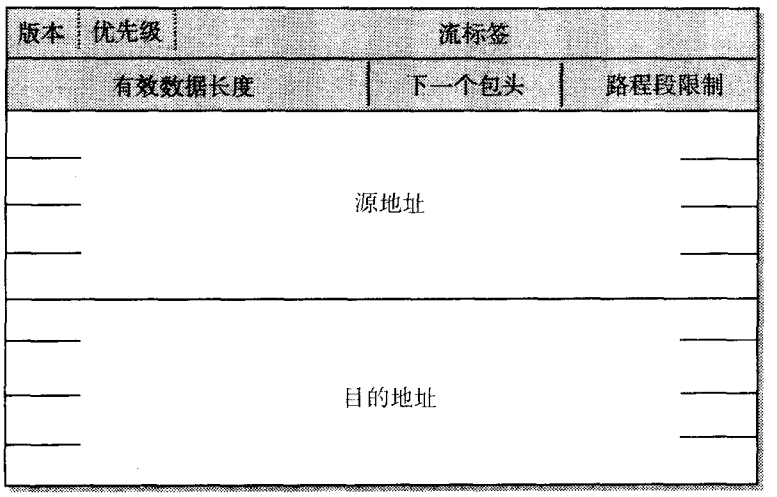

图 1.8　IPv6 包头格式

版本：这个字段的大小和 IPv4 中版本字段的大小是相同的，4 位的版本字段放置数字 6。但是应该注意，使用这个字段时，IPv4 和 IPv6 信息包不是通过版本字段中的版本值来区分的，而是通过 2 层封装（例如，Ethernet 或者 PPP）中的协议类型来区分的。

优先权：4 位优先权字段的 IPv6 包头中可以有 16 个不同的值，这 16 个可能的值进一步分为两组，0 ~ 7 为一组，8 ~ 15 为一组。它使得源节点可以通过为自身产生的信息包分配不同的优先权来区分它们。

0 ~ 7 优先权值用来指定通信量的优先权，信息包发送地用此来进行通信量控制。一个典型的例子是使用 TCP 应用程序的通信量，它的通信量拥塞控制机制以窗口可变大小为基础。RFC1883 建议把表 1.1 中的应用程序和优先权关联起来。

表 1.1　优先权和应用范围之间的连接

优先权	应　　用
0	无特色的通信
1	“过滤”通信（如网络新闻）
2	无人照顾的数据传输（如 E-mail）
3	为将来使用保留
4	有人照管的批量传输（如 FTP、NFS）
5	为将来使用保留
6	交互式通信（如 Telnet、X-Windows）
7	Internet 控制通信（如 RIP、OSPF、BGP、SNMP）

8 ~ 15 优先权值用来指定那些遇到拥塞时不会后退的通信量优先权。典型的例子是类似于电影和声音传输实时信息的包传送。优先权 8 赋予那些系统在拥塞时首先拒绝的信息包，如高保真视频传输，优先权 15 赋予那些发送方只有在绝对必需的情况下才会拒

绝的信息包，如低质量的电话音频传输。

流标签：24 位流标签的 IPv6 包头中，发送方可以用它来标识一系列属于同一个流的信息包。一个流可以唯一地标识为发送方的地址和非零的流标签的组合。多点活动流可能存在于发送方和目的地址之前，这时可以是相同的发送地址，但是取不同的非零流标签。

由此可见，流是以某种方式相关（如发送方、目的地址、QoS、记账、授权、身份验证以及安全这些参数）信息包的序列。流可以是单点传送，即从一个节点到另一个节点；也可以是多点传送，即从一个节点到一组节点。属于同一个流的信息包必须由 IPv6 路由器连续处理，处理属于给定流的信息包的方法，可以由信息包自己提供的信息来指定，也可以由一个控制协议传输过来的信息指定，如 RSVP 协议。RFC1883 规定，在 RFC 发布时和流相关的问题仍然是试验性的，而且在 Internet 流处理要求变得清楚时会受到影响。同时，对于不能支持流标签字段功能的节点，在对信息包进行初始化时，应该把这个字段设置为 0；在转发信息包时，应该保持这个字段不被改变；在接收信息包时应该忽略这个字段。

流的流标签通常分配的是一个随机的数值，由发送节点在 1 ~ FFFFFF（16 进制）之间随机选择。这个数值必须不同于发送节点正在使用以及最近使用过的值。所有属于同一个流的信息包在发送时必须具有相同的发送方地址、目标地址、优先权和流标签。进一步说，如果有逐个路程段或者路由器扩展包头，它们在属于同一个流的信息包里必须是相同的。

在路由器接收到新的流的第一个信息包时，它可以处理 IPv6 包头、逐个路程段或者路由器扩展包头所携带的信息，记住缓存中的结果，然后把结果用于属于同一个流的其他信息包，也就是具有相同的发送方地址和流标签，方法是直接从缓存中读取。

有效数据的长度：2 个子节的有效数据长度字段包含有效数据长度，即 IPv6 包头之后的数据字段的长度，一般以八进制表示。因为它是 16 位的，所以 IPv6 信息包的最大有效数据长度为 64K。如果需要更宽的数据字段，可以使用大有效数据扩展包头。如果有效数据长度字段的值为 0，表明使用了大有效数据。

下一个包头：1 个字节的次字段（Next Header）说明的是 IPv6 包头之后的包头的类型，它位于 IPv6 信息包数据字段（有效数据）的开始处。最常使用的次包头是 TCP（6）和 UDP（17）这两种，但是还有一些其他包头。这个字段采用的格式是 RFC1700 为 IPv4 所建议的，并插入了一些为 IPv6 所做的集成，此包头总体上说和 IPv4 的协议字段是相同的。

路程段限制：信息包每次经过一个路由器时，8 位的路程段包头（Hop Limit）字段的数值就会减 1。如果路程段字段减少为 0，信息包就会被忽略，这个字段的主要功能就是找出并且忽略那些由于错误的路由信息而循环的信息包。很明显，在两个 IPv6 节点之间，不能有多于 255 个路程段，这就意味着最多只有 254 个路由器。

发送方地址：IPv6 地址的格式由 RFC1884 规定。128 位的源地址（Source Address）字段包含的是产生信息包的 IPv6 地址。

目的地址：128 位的目的地址（Destination Address）字段包含的是接收信息包的 IPv6 地址。如果有路由包头，这个地址不是最终的接收地址。

扩展包头：一个 IPv6 信息包可以没有扩展包头，也可以具有一个或几个扩展包头，如

图 1.9 所示的链结构。扩展包头是基于这样一个原理，大多数信息包只需简单的处理，因此 IPv6 包头的基础字段就足够了，在网络层需要额外信息的信息包时，可以把这些信息编码到扩展包头，扩展包头可以位于 IPv6 包头和上层包头之间。包头之间由下一个包头进行连接，这样就组成了一个如图 1.9 所示的结构。应注意的是，IPv4 的包头为一些可选字段留出了空间，这些字段用来为信息包的特殊处理提出要求。这些可选字段并不经常使用，由于它们出现时必须对每个信息包进行检查，所以这个字段会严重地降低路由器的性能，而在 IPv6 中可使用扩展包头来代替可选字段。

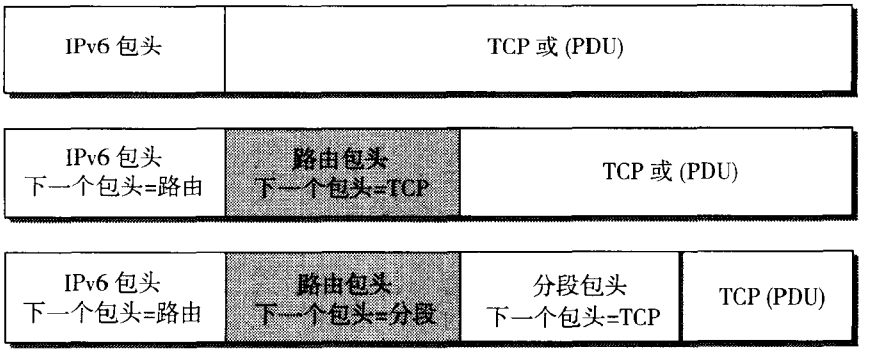

图 1.9　扩展包头示意图

IPv6 的地址格式：IPv6 的主要改变就是地址的长度变为 128 位，128 位的地址长度就可以有 2^{128}个地址，大约是 10^{38}个，假如地球的表面积是 511 263 971 197 990 平方米，那么在每平方米的地球表面上将会有 655 570 793 348 866 943 898 599 个 IPv6 地址，即使考虑到以后向其他星球的移民，这个数值也足够了。可以看出，IPv6 最初只使用了 15% 的地址空间，而 85% 的地址空间留做将来使用。

我们知道，IPv4 地址长度为 32 位(即 4 个字节)，每个字节代表一个无符号整数，4 个字节写成由 3 个点(.)分开的 4 个十进制数，如：224.148.27.24。对于 IPv6 地址来说，定义相似的语法是必要的，但要考虑到 IPv6 地址的长度是原来的 4 倍。由 RFC1884 规定的标准语法推荐把 IPv6 地址的 128 位(即 16 个字节)写成 8 个 16 位的无符号整数，每个整数用 4 个十六进制位表示，这些数之间用冒号(:)分开，例如：

AEDC:FA20:7484:32B0:AEFC:BC91:2645:3214

这个例子可以清楚地看到手工管理 IPv6 地址的难度，同时也说明了动态主机配置协议(DHCP)和域名服务器(DNS)的必要性。某些 IPv6 的设计者看到了用户记忆和书写 IPv6 地址的困难，越来越多的用户被迫使用名称，然后地址就渐渐地变成了一个网络内部的问题，以及信息包的路由方面的问题。需要说明的是，前面这个例子并不很现实，更为现实的地址的例子是：

ABCD:0000:0000:0000:0008:0800:800C:417C

0000:0000:0000:0000:0000:0000:0B00:00001

显然，这些地址很容易用更为紧凑的格式来表示。一个简化方式就是没有必要书写

每一组数值前面的0,例如,可以用0来代替0000,用1来代替0001,用20来代替0020,用300来代替0300。如果使用了这种简化方式,上面的两个地址就会变成下面的形式:

ABCD:0:0:0:8:800:800C:417C

0:0:0:0:0:0:B00:1

可以使用符号::进行更进一步简化,它代表一系列的0。使用了这种简化之后,上面的两个地址将会变成下面的形式:

ABCD::8:800:800C:417C

::B00:1

注意上述简化对每个地址只能使用一次,假设IPv6地址的长度是一定的,因此可以计算出省略了多少个0。这种简化可以用在地址的中间,也可以用在地址的开始或者地址的结尾。如果考虑多点传送、回送或者没有使用的地址,就会认识到这种简化是多么有用,实际上,这些地址的扩展形式如下所示:

2000:0:0:0:0:0:0:43　　一个多点传送地址

0:0:0:0:0:0:0:1　　回送地址

0:0:0:0:0:0:0:0　　没有使用的地址

它们可以使用下面的压缩格式代替:

2000::43　　一个多点传送地址

::1　　回送地址

::　　没有使用的地址

0:0:0:0:0:0:A00这样的特殊地址也是合法的。前面的6个0表明这是一个IPv6地址,里面嵌入了一个IPv4地址。特别要注意的是,这个地址和IPv4地址10.0.0.1是相互联接的。只有在这种情况下,可以使用IPv4/IPv6的混合。它的展开形式如下所示:

0:0:0:0:0:0:10.0.0.1

它的压缩形式如下所示:

::10.0.0.1

IPv6地址前缀的表示方式和IPv4地址前缀在CIDR(Classless Inter-Domain Routing)中的表示方式很相似。一个IPv6地址前缀通常可以表示为IPv6-address/prefix-length的形式,这里IPv6-address是我们上面描述任何形式的地址,而prefix-length表示前缀的长度,一般以位为单位,用10进制数表示。例如,为了表示一个具有80位的前缀的子网,可使用下面的格式:

2040:0:0:0:8::/80

注意这个例子中中间的3个0不能省略,因为::已经用来表示结尾的0。例如,60位长的前缀:

82AB00000000CD3

可以使用下面的合法格式来表示:

82AB:0000:0000:CD30:0000:0000:0000:0000/60

82AB::CD30:0:0:0:0/60

82AB:0:0:CD30::/60

但是,下面的表示方式是不合法的:

82AB:0:0:CD3/60 在任何一个16位的地址块中,可以省略前面的0,但是不能省略结尾处的0。

82AB::CD30/60 左边的地址会展开为:
82AB:0000:0000:0000:0000:0000:0000:CD30

82AB::CD3/60 左边的地址会展开为:
82AB:0000:0000:0000:0000:0000:0000:0CD3

节点地址和它的前缀可以结合起来,如下所示:

节点地址:82AB:0:0:CD30:456:4567:89AB:CDEF

前缀:82AB:0:0:CD30::/60

可以合并成为:82AB:0:0:CD30:456:4567:89AB:CDEF/60

IPv6地址类型通常可分为3类,像RFC1884中规定的那样:

- 单点传送:这种类型的地址是单个接口的地址。发送到一个单点传送地址的信息包只会发送到地址为这种地址的接口。
- 任意点传送:这种类型的地址是一组接口的地址,典型情况下它们属于不同的节点。发送到一个任意点传送地址的信息包只会发送到这组地址中的一个(根据路由的远近,距离发送方节点最近的地址)。
- 多点传送:这种类型的地址是一组接口的地址,典型情况下它们属于不同的节点。发送到一个多点传送地址的信息包会发送到属于这个组的全部接口。

IPv6和IPv4地址之间的区别是在IPv6中出现了任意点传送地址,并以多点传送地址代替了IPv4中的广播地址。

大家知道,地址属于接口,而不是属于节点。一个节点可用任何与它的接口相关的单点传送地址来标识。一个IPv6单点传送地址指的是一个单个的接口。一个单个的接口可以分配多个相同类型或者不同类型(单点传送、任意点传送或者多点传送)的地址。以下是两个例外:

(1) 一个单个的IPv6地址可以分配给属于一个节点的一组接口,前提是IPv6在向IP层传送信息包时把这个组当成一个接口。这个能力在容错系统里是非常有用的,在这个系统中只有一个接口就可以表示单点错误,或者完成一个在多个物理接口之间分担载荷的机制。

(2) 路由器可以具有无编号的接口,即没有任何地址。对于点对点链路上的接口可以出现这种情况,那时提供地址是不必要的。这样就可以简化路由器的设置,但是从管理的角度来看这是不好的。因为如果接口没有和单点传送地址相连接,那么明确地应用一个接口就是不可能的。

1.5 IP网络技术的现状与未来

随着通信与计算机技术的发展,人们进入了以Internet的发展为主导的信息时代。综