



第五章 网络层

课前思考

- 网络层的任务是什么？
- 网络层协议主要涉及哪些内容？
- 报文分组与数据帧有什么关系？
- 报文分组是如何从源主机传输到目的主机的？
- 路由器是如何进行路由选择的？
- 为什么有了MAC地址还需要网络地址？
- 为什么各种异构网络都能接入INTERNET ？





本章内容

5.1 概述

5.2 虚电路和数据报

5.3 路由选择算法

5.4 路由协议简介

5.5 拥塞控制

5.6 IP协议



5.1 概述

- 网络层功能

在数据链路层的支持下，将报文分组从源节点传输到目的节点。

- 网络层与数据链路层的区别

数据链路层仅完成相邻节点之间的数据传输，网络层完成源节点到目的节点的数据传输。

- 报文分组

- 一份完整的信息称为一个报文。
- 分组交换技术将报文划分为若干个较小的格式化信息单位独立传输，这样的格式化信息单位称为报文分组，简称“分组”。“分组”是网络层的协议数据单元（NPDU）。
- 分组的一般格式：

序号	源地址	目的地址	控制信息	长度	数据
----	-----	------	------	----	----

- 分组作为数据帧的数据部分。



5.1 概述

- 网络地址

- 网络地址是主机或节点的标识，即一个网络地址在整个网络中唯一地标识一个主机或节点。
- 网络地址是结构化地址，由网络号和主机号组成。

- 网络层协议涉及的主要内容

- 网络服务方式
- 分组格式
- 路由选择
- 子网划分
- 异构网络互联



5.2 虚电路与数据报

5.2.1 分组交换技术

- 为了提高信道利用率，1964年Baran首次提出分组交换的概念，并于1969年首次在ARPNET上采用分组交换技术。

- 分组交换的基本原理

将一份完整的报文划分为若干个分组，每个分组以存储/转发方式，独立地从源节点传输到目的节点，目的节点收到这些分组重新组装成原报文。

- 分组交换技术特征：化整为零，存储转发。

- 优点

- 使多路数据能够复用一条链路，提高链路的利用率。
- 有利于差错控制。
- 有利于安全性。

- 缺点

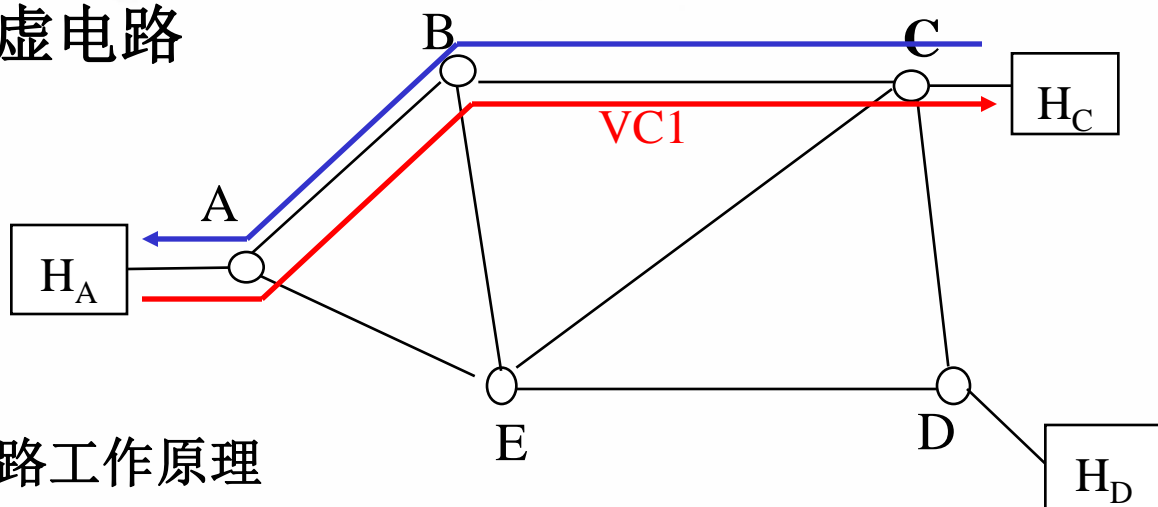
- 当网络拥塞时，会导致分组传输延迟增加，对流媒体影响较大。

- 分组交换技术的两种实现方式：虚电路和数据报。



5.2 虚电路与数据报

5.2.2 虚电路



● 虚电路工作原理

设：主机 H_A 要向 H_C 发送报文分组。

- 首先主机 H_A 向 H_C 发一虚呼叫（虚电路连接请求），该虚呼叫选择一条适当的路径到达 H_C ，记下沿途所经过的路径作为虚电路，如 H_A -A-E-B-C- H_C ，并给其赋一个虚电路号VC1。
- 如果沿途所经过的节点及目的主机 H_C 准备就绪，则 H_C 发一响应给 H_A ； H_A 收到该响应，则虚电路VC1建立完毕。虚呼叫需要向沿途所经过的节点提出请求，任一节点拒绝（由于资源不足），均导致虚电路建立失败。
- H_A 和 H_C 的分组必须通过该虚电路进行传输。
- 分组传输完毕，拆除虚电路，释放虚电路VC1占用的资源。

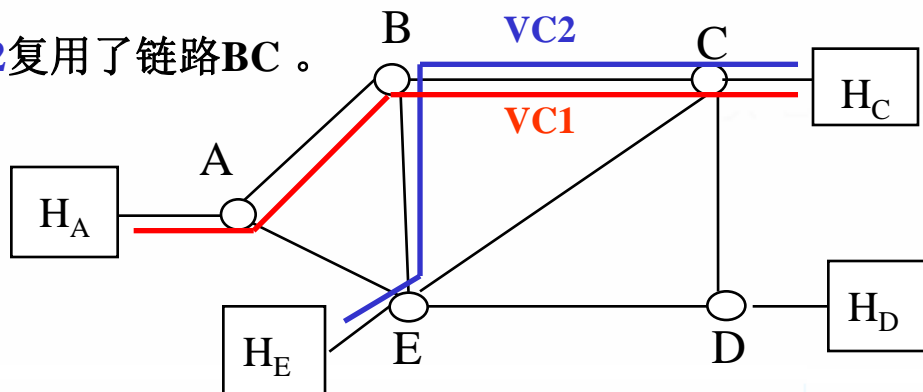


5.2 虚电路与数据报

● 虚电路的特点

- 通信前, 发送方和接收方之间必须建立连接 (虚电路), 所以虚电路是面向连接的网络服务。
- 虚电路只是一种逻辑电路, 而不是真正的物理电路。报文分组在虚电路上传输不像在物理电路上那样中畅通无阻, 而是要经过节点的“存储转发”。
- 一旦虚电路建立完毕, 所有分组必须经过该虚电路进行。因此, 虚电路能够保证分组的顺序到达。
- 仅当建立虚电路时需要源/目的节点地址, 数据分组只需分配一个虚电路号而无需携带完整的源/目的节点地址。
- 一条链路上允许建立多个虚电路。

如图所示, VC1和VC2复用了链路BC。





5.2 虚电路与数据报

● 虚电路号与虚电路表

● 固定虚电路号

- 建立虚电路时，由发起方选择一个固定的虚电路号。
- 每个节点维护一张虚电路表，记录前一个节点、下一个节点、虚电路号等信息。

节点B的虚电路表

前一节点	下一节点	虚电路号	虚电路
A	C	001	H _A -A-B-C-H _C
E	C	002	H _E -E-B-C-H _C

● 动态虚电路号

- 当有多条虚电路时，不同的发起方可能会选择相同的虚电路号。为避免这种情况，常采用动态虚电路号，不同的节点对同一条虚电路可使用不同的虚电路号。
- 每个节点的虚电路表记录两个虚电路号：前一节点选择的虚电路号，本节点选择的虚电路号。

节点B的虚电路表

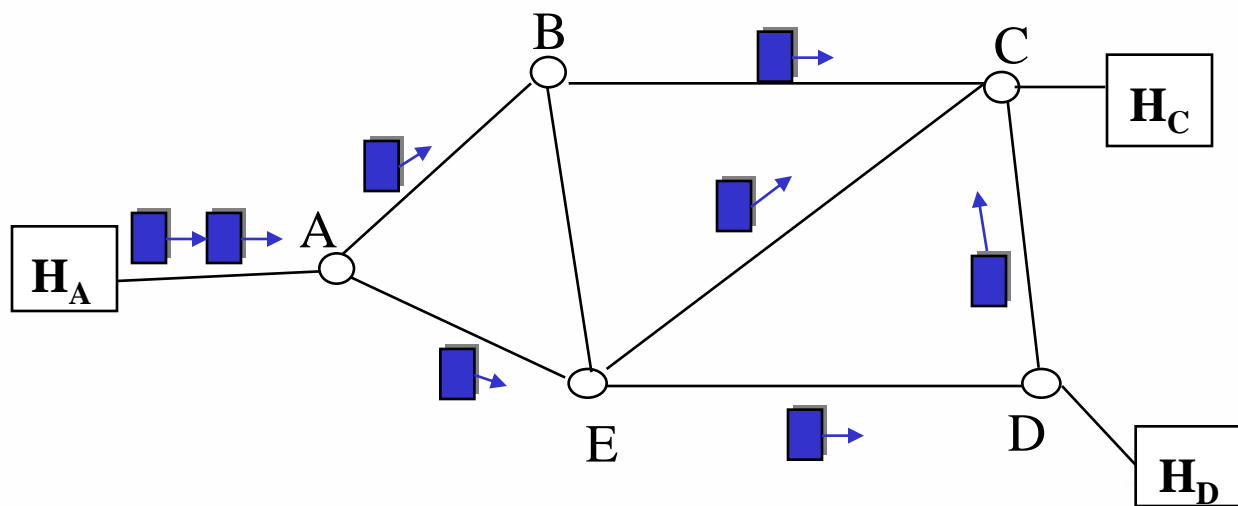
前一节点	下一节点	前一节点虚电路号	本节点虚电路号	虚电路
A	C	001	100	H _A -A-B-C-H _C
E	C	002	201	H _E -E-B-C-H _C



5.2 虚电路与数据报

5.2.3 数据报

- 数据报无需建立连接，每个分组携带完整的源/目的地址，独立的选择路径，通过不同的路径到达目的主机。





5.2 虚电路与数据报

- 数据报的特点
 - 无需建立连接就可传输报文分组，因此数据报称为非面向连接的网络服务。
 - 不同的分组可以通过不同的路由到达目的主机，先发出的分组未必先到；因此数据报不能保证分组的顺序到达。
 - 每个分组携带完整的源/目的地址，独立的选择路径。



5.2 虚电路与数据报

5.2.4 数据报与虚电路的比较

	数据报	虚电路
延时	分组传输延时	虚电路建立延时，分组传输延时
路由选择	每个分组单独选择路由	建立虚电路时选择路由，以后所有分组都使用该路由
状态信息	子网无需保存状态信息	每个结点要保存一张虚电路表
地址	每个分组携带完整的源/目的地址	每个分组分配一个较短的虚电路号
节点失败的影响	除了崩溃时正在该节点处理的分组都丢失外，无其他影响	所有经过失效节点的虚电路都要被终止
拥塞控制	难	容易



5.3 路由选择

5.3.1 路由选择及其分类

- 路由选择：根据某种策略，选择一条到达目的主机的最佳路径。
- 路由选择由路由器完成；对单个路由器而言，路由选择实质上是选择最佳输出链路（端口），多个路由器协作选择一条最佳路由。
- 路由选择是网络层最重要功能，无论是虚电路，还是数据报都要进行路由选择。虚电路仅需要一次路由选择（虚呼叫），数据报需要为每个分组选择路由。
- 路由选择分类
 - 静态路由：按照某种固定的规则进行路由选择，不随网络流量和拓扑结构变化而变化。
 - 动态路由：根据当前拓扑结构和流量的变化来动态改变路由，又称为自适应路由。



5.3 路由选择

5.3.2 静态路由算法

- 扩散法（洪泛法）

- 当节点收到一个分组后，向除进来的链路外的所有其他链路转发（扩散），其结果是至少有一个分组以最快的速度到达目的节点。
- 问题：扩散过程产生大量重复分组（就像洪水泛滥一样），导致网络无法运行。
- 解决措施：每个分组设置一个下跳数字段，每经过一个节点下跳数减1；当下跳数为0时，丢弃该分组。

- 固定式路由选择

- 每个结点保存一张固定的路由表，当某一分组到达时，根据分组的目的地地址，在路由表中找到其对应的输出链路。



5.3 路由选择

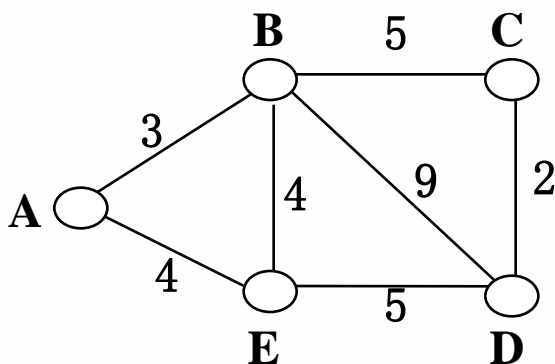
- 路由表一般结构

目的节点	最短距离	最佳输出链路
------	------	--------	-------

这里的“距离”是广义的，表示到达目的节点所要付出的“代价”，可以是实际距离、平均流量、延迟、下跳数等。

- 网络管理员为每个路由器配置固定路由表，固定路由表一旦生成，就不再改变，除非网络管理员重新配置。

节点C 的路由表



目的节点	最短距离	最佳输出链路
A	8	C → B
B	5	C → B
C	0	—
D	2	C → D
E	7	C → D



5.3 路由选择

- 优点：简单，路由算法开销小。
- 缺点：不能适应网络流量和拓扑结构的变化。
- 适用：小规模网络。



5.3 路由选择

5.3.3 动态路由算法

- 热土豆算法

- 基本思想

当节点收到一个分组后，选择一条输出队列最短的链路尽快的将其转发出去，而不管目的节点位于何方。

- 优点：尽量提高链路的利用率。
- 缺点：盲目性。
- 改进：与固定式路由算法混合使用。
 - 首先根据固定路由算法选择可能的输出链路，并给这些链路赋上一定权值；
 - 再根据链路队列长度，赋上一定权值；
 - 选择这两个权值之和最小的链路。



5.3 路由选择

- 逆向自学习算法

- 每个节点保存一张转发表（路由表），该表主要字段包括：

.....	目的地址	输出端口	时间戳
-------	------	------	-----	-------

- 初始时转发表为空。
- 当数据包到达节点时，
 - 将数据包的源地址视为转发表的目的地地址，输入端口视为转发表的输出端口；如果转发表存在该目的地地址，则刷新该记录；如果转发表不存在该目的地地址，则增加一条新记录。
 - 根据数据包的目的地地址，查询转发表；如果找到，则从指定的输出端口转发；如果找不到，则广播。
- 定期扫描转发表，清除过时的记录。



5.3 路由选择

● 距离向量路由算法（D-V算法）

- 该算法最早在ARPANET中使用，后在Internet及Novell网的IPX中使用，即RIP协议。
- 基本思想

每个节点都保存一张动态路由表，路由表包括目的节点地址，最短距离、最佳输出链路。与固定式路由选择不同的是：相邻结点之间定期交换路由信息（如每隔30秒），并根据最新路由信息，刷新路由表。

● 初始化

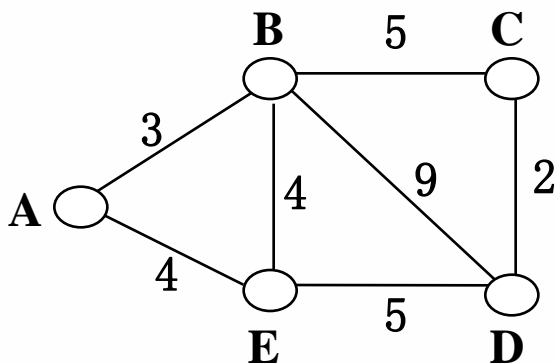
- 当节点加入网络时，获取直接相连的链路情况（无需知道网络全局拓扑）；
- 构建初始路由表，初始路由表中的目的节点仅包含直接相连的节点，“距离”值置为0；
- 将初始路由表发给直接相连的节点。



5.3 路由选择

● 路由信息更新

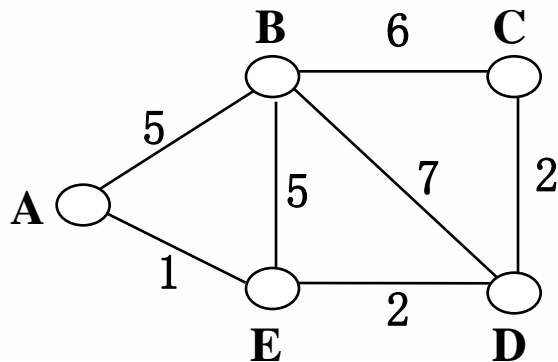
➤ 当前网络状态



节点C的当前路由表

目的节点	最短距离	最佳输出链路
A	8	C → B
B	5	C → B
C	0	—
D	2	C → D
E	7	C → D

➤ 下一周期网络状态



相邻结点发给C的路由信息

邻结点 距离 目的节点	B	D
A	5	3
B	0	7
C	6	2
D	7	0
E	5	2



5.3 路由选择

经过一个周期后，节点C修改步骤如下：

- C实测到达相邻结点B, D的“**距离**”。若以**延迟**为“距离”度量，C向 B, D发出探测分组，该分组记录发出时间和接收时间，那么链路延迟就是接收和发出的时间差。（ **$C \rightarrow B: 6$** ， **$C \rightarrow D: 2$** ）
- 收到相邻结点B，D发来的路由信息后，重新生成下一周期路由表。

下一周期结点C 路由表

目的节点	最短距离	最佳输出链路
A	5	$C \rightarrow D$
B	6	$C \rightarrow B$
C	0	—
D	2	$C \rightarrow D$
E	4	$C \rightarrow D$

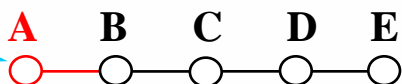


5.3 路由选择

● D-V算法优缺点

- 优点：由于仅相邻节点交换路由信息，所以运算量和交换的信息量较小。
- 缺点：收敛速度慢，对网络变化需经若干周期才能作出反应。特别是对好消息反应快，对坏消息反应迟钝。

节点A加入网络

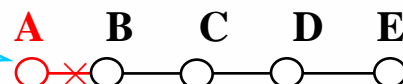


初始时	∞	∞	∞	∞
第1次交换后	1	∞	∞	∞
第2次交换后	1	2	∞	∞
第3次交换后	1	2	3	∞
第4次交换后	1	2	3	4

经过4次交换，节点A加入网络（好消息）传遍全网。

链路A-B崩溃（坏消息）要经过无穷次交换才能传遍全网，即所谓“**无穷计数**”问题。

链路A-B崩溃



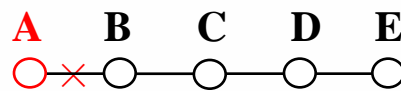
初始时	1	2	3	4
第1次交换后	3	2	3	4
第2次交换后	3	4	3	4
第3次交换后	5	4	5	4
第4次交换后	5	6	5	6
第5次交换后	7	6	7	6
.....				
.....	∞	∞	∞	∞



5.3 路由选择

- 无穷计数问题的解决

- 规定一个足够大的数作为 ∞ ，如RIP规定为16；缺点是限制了网络规模。
- 水平分割法，即不允许将从相邻节点获得的路由信息再提供给该相邻节点。



由于C到A的路由是B提供的，所以B不接受C提供的关于A的路由信息。

初始时		1	2	3	4
第1次交换后		∞	2	3	4



5.3 路由选择

- 链路状态路由选择算法（L-S算法）
 - 从1979年开始，ARPANET以及后来的Internet的内部网关协议由距离向量算法改为链路状态算法。
 - 基本思想

所有节点相互交换路由信息，并根据最新路由信息刷新路由表。
 - L-S算法描述
 - 发现邻居结点

当一个路由器启动以后，通过向每个端口发送特殊的HELLO分组来发现邻居结点；收到HELLO分组的路由器应返回一个应答来说明它的网络地址。
 - 测量相邻链路开销

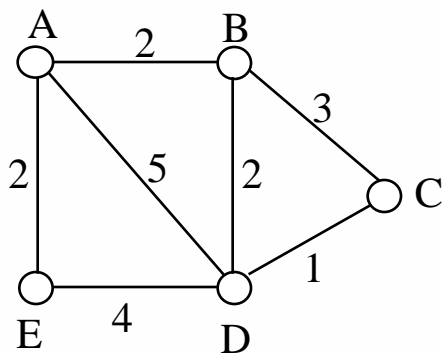
通过发送特殊的ECHO分组来实现，测量其往返时间，再除以2。



5.3 路由选择

➤ 产生链路状态分组

每个节点实测所有相邻链路的开销，创建链路状态分组（L-S分组）。



D	
序号	
生存期	
A	5
B	2
C	1
E	4

D节点当前L-S分组

D: 表示节点D产生的L-S分组。

序号: IP协议用32位表示序号; 如果一个L-S分组到达时, 其序号比最近到达的序号小, 则丢弃, 以保证节点收到的是最新的L-S分组。

生存期: 在L-S分组广播过程中, 每经过一个节点递减1, 一旦生存期为0, 则丢弃。



5.3 路由选择

➤ 广播L-S分组

每个节点向其他所有节点广播自己的L-S分组。

➤ 刷新路由表

结点获得最新L-S分组后，用最短路径算法计算到其他结点的最短路由，并刷新路由表。

- 优点：对网络变化反应迅速（只需一个周期）。
- 缺点：广播L-S分组占用信道带宽大。
- 应用：Internet的内部网关协议采用L-S算法。

● D-V和L-S算法的比较

	D-V	L-S
交换路由信息	定期	网络拓扑发生改变
交换范围	相邻结点	全网
路由更新	缓慢	迅速
适用范围	变化缓慢的网络	变化较激烈的网络



5.4 路由协议简介

5.4.1 路由信息协议（RIP）

- RIP采用D-V算法，用于小规模网络。
- 技术特点
 - 距离：下跳数，允许对下跳数加权。
 - 路由信息交换周期：缺省值为30秒。
 - 无穷计数问题：RIP选择16作为 ∞ ；为了加快收敛速度，RIP采用水平分割技术。
 - RIP消息交换：通过UDP协议传输，端口号为520。



5.4 路由协议简介

5.4.2 开放最短路由优先协议（OSPF）

- OSPF采用L-S算法，是目前Internet的主要内部网关协议。
 - 自治系统（AS）
 - 由一个独立的管理实体控制的网络称为自治系统。每个自治系统由ICANN（Internet Corporation for Assigned Names and Numbers）分配唯一的自治系统编号。
 - Internet规模非常庞大，导致D-V算法收敛性很差，L-S算法会产生广播风暴，而且路由表也会变得非常大。
 - 因此，Internet采用层次路由架构：
 - （1）自治系统内部路由选择协议，称为内部网关协议（IGP）。
 - （2）自治系统之间的路由选择协议，称为外部网关协议（EGP）。
 - 不同的自治系统允许采用不同的路由协议，每个自治系统采用相同的路由协议。



5.4 路由协议简介

● OSPF技术特点

- 距离：允许网络管理员选择多种“距离”度量，如延迟，数据率，通信费用，下跳数等。
- OSPF支持区域概念。
 - 为了简化路由规模，一个自治系统允许划分成一个主域和若干个本地域。主域的ID为0（0.0.0.0）
 - 本地域都与主域相连，所有本地域之间的路由必须通过主域。
- OSPF支持认证服务，防止发送假L-S分组来愚弄路由器。
- OSPF不用UDP而直接利用IP分组发送消息（L-S分组），IP分组的协议号为89。



5.4.3 边界网关协议（BGP）

5.4.3 边界网关协议（BGP）

- 内部网关协议（IGP）与外部网关协议（EGP）的区别：
 - IGP注重效率
 - EGP注重策略
- 作为Internet外部网关协议，用于不同AS之间的路由选择。
- 技术特点
 - BGP采用**路径向量路由**算法，路由表中记录到达目的地的**确切路由**，而不是**最短距离**，从而解决“无穷计数”问题。
 - 每个AS至少要有设置一个边界路由器，边界路由器连接若干个AS，BGP完成边界路由器之间的路由选择。
 - 支持策略路由，这些策略包括政治、安全和经济方面因素。如：
 - 国内站点转发不应经过国外AS兜圈子
 - 只有付了服务费的AS才允许通过本AS
 - 自治系统A与自治系统B相比时，应优先选择自治系统B
 -



5.5 IP协议

5.5.1 概述

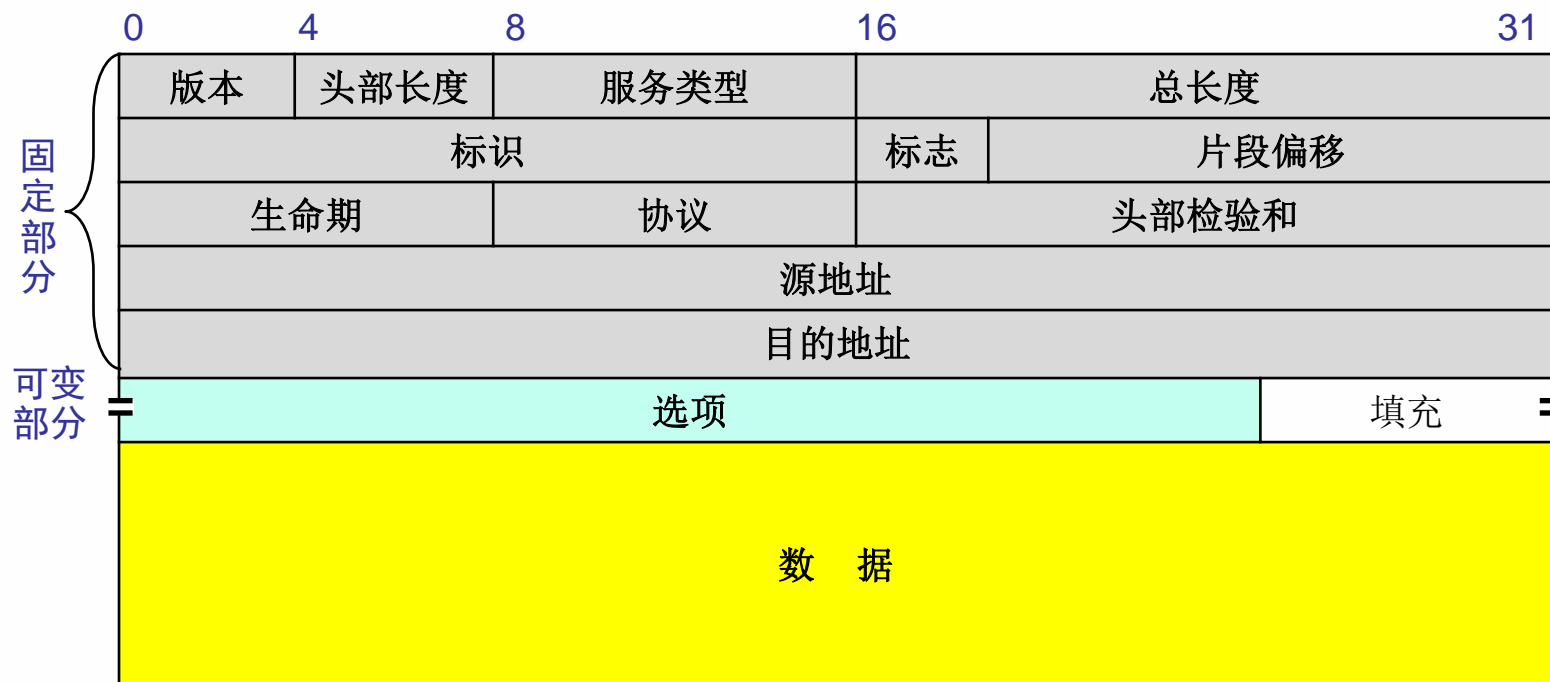
- IP协议是Internet体系结构的核心协议，该协议已成为连接异构网络的工业标准。
- IP提供非面向连接的数据报服务，每个IP分组长度 $\leq 64\text{K}$ 字节，传输效率高，但不能保证分组可靠的、按序到达。
- IP协议需要路由协议，ICMP，ARP，RARP等协议支持。
- IP协议包括IPv4和IPv6两个版本，本节主要介绍IPv4。



5.5 IP协议

5.5.2 IP分组格式

- IP分组由IP报头和数据组成，IP报头包括固定部分和可变部分。



- 版本:** 4位，表示IP协议的版本号；4表示IPv4，6表示IPv6。
- 头部长度:** 4位，给出IP报头的长度，单位为字（32位）；最小值为5（无任何选项），最大值为15（头部最大长度为60字节）。



5.5 IP协议

- **服务类型：**告诉路由器该IP分组想获得何种服务，包括优先级、延迟、吞吐量和可靠性要求。该字段共有8位：
 - 前3位：表示优先权。
 - 中3位 (D、T、R)：表示想获得的服务质量（延迟，吞吐量，可靠性）。
 - 后2位：保留。
 - 注：几乎所有路由器都忽略“服务类型”字段。
- **总长度：**表示整个IP分组长度，包括报头和数据部分；该字段16位，所以IP分组最大长度 $2^{16}-1=65535$ 字节（ $\approx 64\text{KB}$ ）。
- **标识：**16位，用来标识一个分组，同一分组的不同分段具有相同的标识。
- **标志：**3位。
 - 第1位：保留
 - 第2位：DF位（Don't Fragment）。若DF=1，则IP分组在传输中不允许分段，如目的主机从远方引导启动机器的映像文件，目的主机无能力重组分组。若DF=0，则允许分段。
 - 第3位：MF位（More Fragment）。若MF=0，则该分段是原分组的最后一个分段。



5.5 IP协议

- **分段偏移**：表示分段在原分组中所处位置的偏移量，单位为8字节，起始偏移量为0。由于该字段为13位，所以一个分组最多有 $2^{13} = 8192$ 个分段。
- **生命期**：该字段限制IP分组在Internet中的生存期，通常用下跳数表示，分组每经过一个路由器，则自动减1；当该字段为0时，则丢弃该分组，并向源节点发出ICMP警告信息。
- **协议**：表示IP的上层协议，即IP分组将递交给哪一个高层协议处理（如TCP、UDP等）。
- **头部校验和**：将头部所有16位半字按二进制反码累加，再取其结果反码，以便接收端对IP头部进行校验。该字段每经过一个路由器都要重新计算，因为至少“生命期”字段会改变。
- **源/目的地址**：源节点和目的节点IP地址（各32位）。
- **数据**：封装IP上层协议的载荷数据，如TCP或UDP报文段、ICMP消息等。



5.5 IP协议

- 选项

- 安全

- 告诉路由器如何保证IP分组的安全性；例如，该分组不能经过某些路由器。

- 严格的源路径

- 以IP地址序列形式给出完整的源/目的路径，分组严格地按照此路径传输。

- 宽松的源路径

- 以IP地址序列形式给出到达目的节点必须经过的路由器，但也允许经过其他路由器。

- 路由记录

- 告诉沿途经过的路由器将他们的IP地址加入到该选项中，以便接收端能够知道该分组经过哪条路由到达。

- 时间标记

- 类似“路由记录”，但除记录路由器的IP地址外，还要记录时间标记。



5.5 IP协议

5.5.3 IP地址

● IP地址概述

- IP网络中的每台主机至少要分配一个IP地址，一台路由器需要分配多个IP地址（每个端口需分配一个IP地址），每个IP地址只能分配给一台主机或路由器。
- Internet上IP地址由Internet名字与号码分配机构（ICANN）分配。
- IP地址32位，通常用带点的4个十进制数表示；如：240.45.245.9。

● IP地址结构

	0	8	16	24	31	
A类	0	网络号	主机号			1.0.0.0—127.255.255.255
B类	10	网络号	主机号			128.0.0.0—191.255.255.255
C类	1 1 0	网络号	主机号			192.0.0.0—223.255.255.255
D类	1 1 1 0	组播地址				224.0.0.0—239.255.255.255
E类	1 1 1 1 0	保留				240.0.0.0—247.255.255.255



5.5 IP协议

- A类：共有 $2^7-2=126$ 个网络，每个网络最多有 $2^{24}-2\approx 1.6\times 10^7$ 台主机。
- B类：共有 $2^{14}-2=16382$ 个网络，每个网络最多有 $2^{16}-2=65534$ 台主机。
- C类：共有 $2^{21}-2\approx 200$ 万个网络，每个网络最多有 $2^8-2=254$ 台主机。
- D类：用于组播。
- E类：保留。
- 特殊的IP地址
 - 32位全“0”：表示本机地址，仅当初始启动时使用，以后不再使用。
 - 32位全“1”：本地网络的广播地址。
 - 主机号全“1”：广播地址。

例如，192.210.200.255表示192.210.200.0的所有主机。
 - 主机号全“0”：表示网络号。

例如，例192.254.252.0表示一个C类网络。
 - 127.xxx.yyy.zzz：系统保留作为回路自测。

发到127.xxx.yyy.zzz的分组实际上并不发送到网络上，而是经过内部处理后又返回本机。



5.5 IP协议

- 内部IP地址（私用地址）

- A类：10.0.0.0（1个网络）。
- B类：172.16.0.0 — 172.31.0.0（16个网络）。
- C类：192.168.0.0 — 192.168.255.0（256个网络）。

Internet的路由器不会转发目的地址为上述地址的IP分组，即私用地址不能穿越内部网络边界。

- 路由器IP寻址

- 路由器根据目的网络号而不是目的IP地址转发IP分组，以减少路由表的信息量。

路由器保存一张路由表，该表保存的主要内容：（目的网络号，最佳输出链路，...），指示如何到达目的网络，至于到达该网络后，如何到达目的主机则不是路由器所考虑的。

- 当一个分组到达时，路由器通过子网掩码获取它的网络号。如果是本网，则该IP分组直接发送到指定主机；如果是其他网络，则根据路由表转发到下一路由器。
- 如果路由表中找不到目的网络，则将该分组转发到“缺省链路”。



5.5 IP协议

5.5.4 Internet控制协议

IP协议用于分组传输，Internet还需要一些控制协议，包括ICMP，ARP，RARP等。

- ICMP协议

ICMP用于报告IP协议运行过程中意外事件的发生，也用于网络测试。ICMP消息主要有12种，这些ICMP消息封装在IP分组中传输。因此，ICMP消息可视为“IP控制分组”。

主要ICMP消息：

- 目的不可达：当目的路由器无法找到目的主机，或者DF为“1”的分组经过MTU较小的网络而无法传输时，返回该消息。
- 超时：当分组的生命期减至0时，则自动丢弃该分组，并返回该消息。
- 参数出错：当IP头部参数出现非法值时，返回该消息，说明发送主机或路由器软件有问题。



5.5 IP协议

- **源抑制**：源主机收到该消息后，则降低发送速度，以减轻网络拥塞。
事实上，该消息几乎从未使用，因为当网络拥塞时，再发送“源抑制”分组等于火上浇油。目前，Internet的拥塞控制主要由传输层的TCP完成。
- **重导向**：当某路由器发现某分组的路由选择有问题时，向源主机返回该消息。
- **回声请求与应答**：这两个消息用于测试目的地址是否可达和目的主机工作是否正常。
- **时间戳请求与应答**：用于记录探测分组的发出时间和到达时间，通过计算时间差，可得到分组的当前延迟。
- **其他ICMP消息**：主要涉及到Internet的地址问题，不常用。



5.5 IP协议

5.5.4 ARP协议

- 问题

- IP地址是网络层地址，链路层无法识别。当知道目的IP地址后，目的路由器必须获得对应的目的MAC地址，才能构造出MAC帧发送到目的主机。
- 每台主机使用的IP地址不允许重复。因此，主机配置IP地址后，必须检测该IP地址是否已被使用。

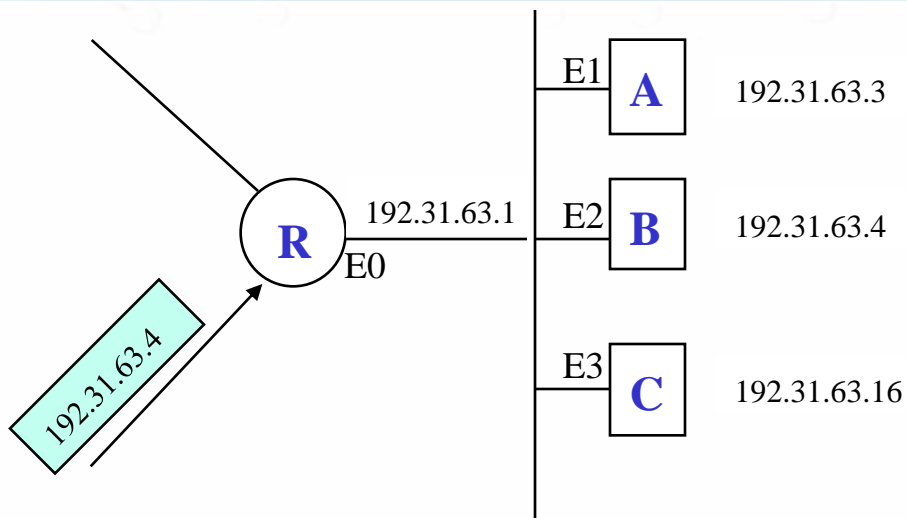
- ARP协议的功能

- 地址解析，即根据IP地址找到相应的MAC地址。
- 检测IP地址是否可用。

- 地址解析



5.5 IP协议



➤ R收到目的地址192.31.63.4的分组，知道要从E0端口转发。

➤ 广播询问帧：

.....	全“1”	E0	192.31.63.4
-------	------	----	-------	-------------

询问谁的IP地址是192.31.63.4?

➤ B返回响应帧：

.....	E0	E2	192.31.63.4
-------	----	----	-------	-------------

告诉R，我的IP地址是192.31.63.4，MAC地址是E2。

➤ R收到B的响应帧，知道目的MAC地址为E2，于是为要转发的分组

构造数据帧，并从E0端口转发。



5.5 IP协议

● ARP分组格式

硬件类型（2字节）		协议类型（2字节）
硬件地址长度（1字节）	协议地址长度（1字节）	操作（2字节）
源MAC地址（6字节）		
源IP地址（4字节）		
目的MAC地址（6字节）		
目的IP地址（4字节）		

- 硬件类型取值为1，表示以太网。
- 协议类型为0x0800,表示IP协议。
- 硬件地址长度为6，表示48位MAC地址。
- 协议地址长度为4，表示32位IP地址。
- 操作：请求为1，响应为2。



5.5 IP协议

● ARP缓存

- 为了提高效率，减少ARP广播，当收到某主机的ARP请求或响应分组后（ARP请求或响应分组中均含有IP/MAC地址），将IP/MAC地址映射（对应关系）保存在ARP缓存中，若缓存中已有该映射，则更新。
- 当下一分组到达时，先查找ARP缓存，若找到对应的MAC地址，则无需广播ARP询问帧。
- ARP缓存时间缺省值为20分钟；如果缓存超时，则该主机很可能关机或移动到其他网络上，相应的IP/MAC地址映射就会从ARP缓存中移除。

● 检测IP地址是否可用

- 主机配置IP地址后，广播一个ARP请求分组，询问其他主机是否已使用了该IP地址。
- 若其他主机已使用了该IP地址，则返回一个ARP响应分组，告知该IP地址冲突。



5.5 IP协议

5.5.5 IP子网

- 子网

- 将一个网络（A，B或C类）内部分割成若干部分，每个部分称为一个子网。
- 子网对外部不可视。

- 子网掩码

- IP地址由两部分组成：网络号+主机号。
- 子网掩码由32位组成，用于获取IP地址中的网络号，即：

网络号=IP地址 \cap 子网掩码

- 在不进行子网划分的情况下，每个网络（A，B或C类）都有一个缺省的子网掩码，分别是：

A类：255.0.0.0

B类：255.255.0.0

C类：255.255.255.0



5.5 IP协议

● 子网划分

● 为什么进行子网划分？

- 充分利用IP地址
- 便于网络管理

● 如何进行子网划分？

子网划分的实质是用若干位主机号来标识子网号。子网数目越多，则每个子网内的主机数目越少；子网数目越少，则每个子网内的主机数目越多。子网划分步骤：

- 确定子网数目和子网内的最大主机数目。

路由器的每个端口对应一个子网！

- 确定用几位主机号来标识子网号。

设：需要的子网数目为n，子网内的最大主机数目为m，原主机号为k位，取x位作为子网号，则：

$$\begin{cases} 2^x - 2 \geq n \\ 2^{k-x} - 2 \geq m \end{cases}$$

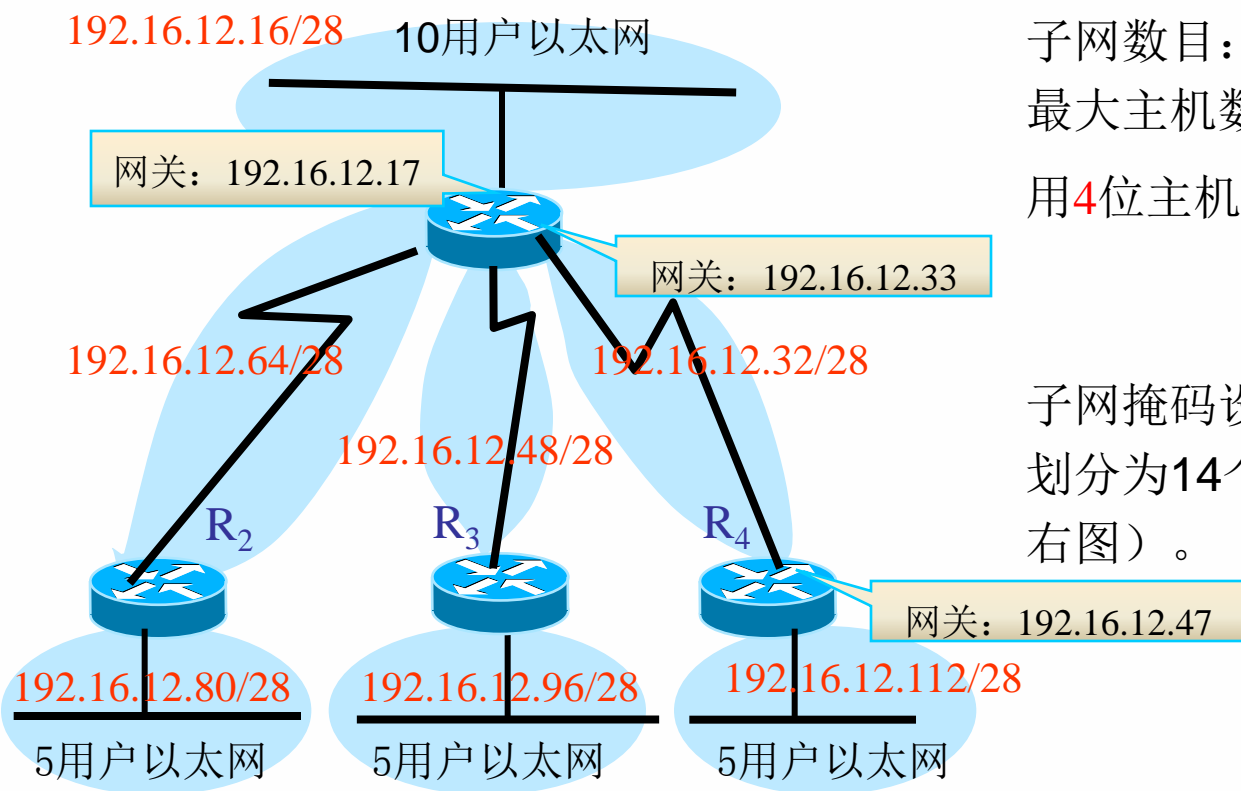
- 选择子网号，配置子网掩码、网关地址。



5.5 IP协议

● 子网划分举例

某公司的网络结构如下，现有一个C类网：192.16.12.0，试对该C类网进行子网划分。



子网数目: 7个

最大主机数目: 11个

用4位主机号标识子网

$$2^4 - 2 = 14 > 7$$

$$2^{8-4} - 2 = 14 > 11$$

子网掩码设置为255.255.255.240，可划分为14个子网，从中任选7个（见右图）。



5.5 IP协议

选7个子网号为:

192.16.12.16

网关: 192.16.12.17

192.16.12.32

网关: 192.16.12.33
192.16.12.47

192.16.12.48

网关: 192.16.12.49
192.16.12.63

192.16.12.64

网关: 192.16.12.65
192.16.12.79

192.16.12.80

网关: 192.16.12.81

192.16.12.96

网关: 192.16.12.97

192.16.12.112

网关: 192.16.12.113



本章小结

● 内容

主要介绍报文分组在源/目的节点之间传输过程中所涉及的相关技术，包括分组交换技术、数据报和虚电路、路由选择、拥塞控制，以及网络层协议实例IP协议、ICMP协议、ARP协议和子网划分等。

● 重点

数据报和虚电路

路由选择算法

IP协议

ARP协议

子网划分