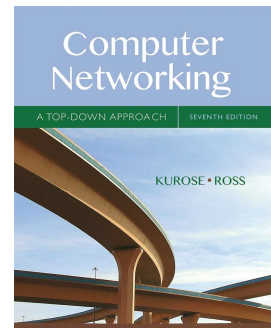


## 第 5 章 网络层：控制平面

中国科学技术大学  
自动化系 郑炅  
改编自 Jim kurose, Keith Ross



*Computer Networking: A Top Down Approach*  
7<sup>th</sup> edition  
Jim Kurose, Keith Ross  
Pearson/Addison Wesley  
April 2016

## 第5章：网络层控制平面

**本章目标：**理解网络层控制平面的工作原理

- 传统路由选择算法
- SDN 控制器
- ICMP: Internet Control Message Protocol
- 网络管理（略）

以及它们在互联网上的**实例和实现**：

- OSPF, BGP, OpenFlow, ODL 和 ONOS 控制器, ICMP, SNMP

网络层：控制平面 5-2

## 第5章：提纲

### 5.1 导论

### 5.2 路由选择算法

- link state
- distance vector

### 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择

- RIP
- OSPF

### 5.4 ISP之间的路由选择： BGP

### 5.5 SDN控制平面

### 5.6 ICMP：因特网控制报文协议

### 5.7 网络管理和SNMP（略）

网络层：控制平面 5-3

## 网络层功能

**回顾：2个网络层功能：**

- **转发**：将分组从路由器的一个输入端口移到合适的输出端口 **数据平面**
- **路由**：确定分组从源到目标的路径 **控制平面**

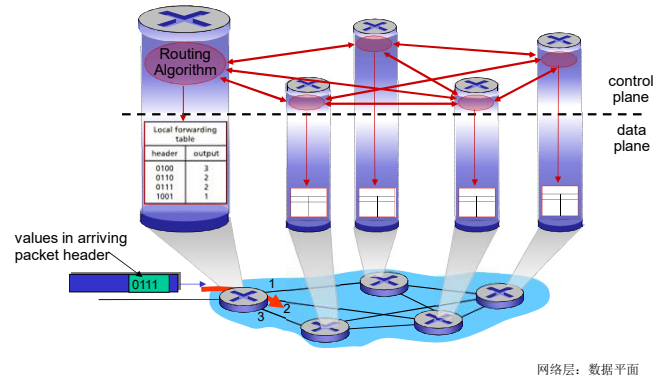
**2种构建网络控制平面功能的方法：**

- 每个路由器控制功能实现（传统）
- 逻辑上集中的控制功能实现 (software defined networking)

网络层：控制平面 5-4

## 传统方式：每-路由器 (Per-router) 控制平面

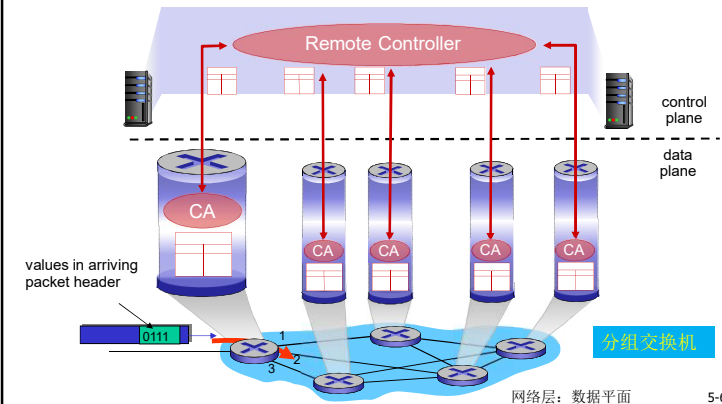
在每一个路由器中的单独路由器算法元件，在控制平面进行交互



5-5

## SDN方式：逻辑上集中的控制平面

一个不同的（通常是远程的）控制器与本地控制代理（CAs）交互



5-6

## 第5章：提纲

### 5.1 导论

### 5.2 路由选择算法

- link state
- distance vector

### 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择

- RIP
- OSPF

### 5.4 ISP之间的路由选择：BGP

### 5.5 SDN控制平面

### 5.6 ICMP：因特网控制报文协议

### 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-7

## 路由(route)的概念

- 路由:按照某种指标(传输延迟,所经过的站点数目等)找到一条从源节点到目标节点的较好路径
  - 较好路径: 按照某种指标较小的路径
  - 指标:站数, 延迟,费用,队列长度等, 或者是一些单纯指标的加权平均
  - 采用什么样的指标,表示网络使用者希望网络在什么方面表现突出,什么指标网络使用者比较重视
- 以网络为单位进行路由(路由信息通告+路由计算)
  - 网络为单位进行路由, 路由信息传输、计算和匹配的代价低
  - 前提条件是: 一个网络所有节点地址前缀相同, 且物理上聚集
  - 路由就是: 计算网络 到其他网络如何走的问题

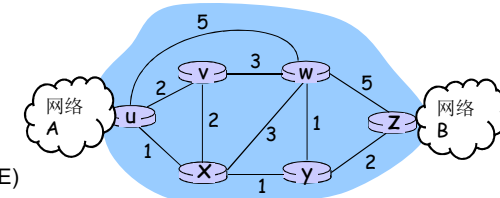
网络层：控制平面 5-8

## 路由(route)的概念

- 网络到网络的路由= 路由器-路由器之间路由
  - 网络对应的路由器到其他网络对应的路由器的路由
  - 在一个网络中: 路由器-主机之间的通信, 链路层解决
  - 到了这个路由器就是到了这个网络
- 路由选择算法(routing algorithm): 网络层软件的一部分, 完成路由功能

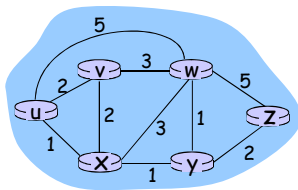
网络层: 控制平面 5-9

## 网络的图抽象

图:  $G = (N, E)$  $N = \text{路由器集合} = \{u, v, w, x, y, z\}$  $E = \text{链路集合} = \{(u,v), (u,x), (v,x), (v,w), (x,w), (x,y), (w,y), (w,z), (y,z)\}$   
边有代价

网络层: 控制平面 5-10

## 图抽象: 边和路径的代价

•  $c(x, x') = \text{链路的代价 } (x, x')$ - e.g.,  $c(w, z) = 5$ 

- 代价可能总为 1
- 或是 链路带宽的倒数
- 或是 拥塞情况的倒数

Cost of path  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) = c(x_1, x_2) + c(x_2, x_3) + \dots + c(x_{p-1}, x_p)$ 

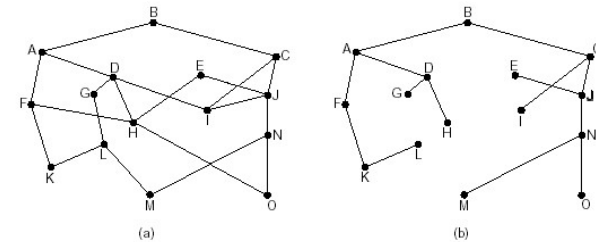
路由的输入: 拓扑、边的代价、源节点  
 输出的输出: 源节点的汇集树

网络层: 控制平面 5-11

## 最优化原则(optimality principle)

### □ 汇集树(sink tree)

- 此节点到所有其它节点的最优路径形成的树
- 路由选择算法就是为所有路由器找到并使用汇集树



网络层: 控制平面 5-12

## 路由的原则

### □ 路由选择算法的原则

- 正确性(correctness): 算法必须是**正确**的和**完整**的, 使分组一站一站接力, 正确发向目标站; 完整: 目标所有的站地址, 在路由表中都能找到相应的表项; 没有处理不了的目标站地址;
- 简单性(simplicity): 算法在计算机上应简单: 最优但复杂的算法, 时间上延迟很大, 不实用, 不应为了获取路由信息增加很多的通信量;
- 健壮性(robustness): 算法应能适应**通信量**和**网络拓扑**的变化: 通信量变化, 网络拓扑的变化算法能很快适应; 不向很拥挤的链路发数据, 不向断了的链路发送数据;

网络层: 控制平面 5-13

## 路由的原则 (续)

### □ 路由选择算法的原则

- 稳定性(stability): 产生的路由不应该摇摆
- 公平性(fairness): 对每一个站点都公平
- 最优性(optimality): 某一个指标的最优, 时间上, 费用上, 等指标, 或综合指标; 实际上, 获取最优的结果代价较高, 可以是次优的

网络层: 控制平面 5-14

## 路由算法分类

### 全局或者局部路由信息?

#### 全局:

- 所有的路由器拥有完整的拓扑和边的代价的信息

#### □ “link state” 算法

#### 分布式:

- 路由器只知道与它有物理连接关系的邻居路由器, 和到相应邻居路由器的代价值

- 叠代地与邻居交换路由信息、计算路由信息

#### □ “distance vector” 算法

### 静态或者动态的?

#### 静态:

- 路由随时间变化缓慢

#### 动态:

- 路由变化很快
  - 周期性更新
  - 根据链路代价的变化而变化

非自适应算法(non-adaptive algorithm): 不能适应网络拓扑和通信量的变化, 路由表是事先计算好的

自适应路由选择(adaptive algorithm): 能适应网络拓扑和通信量的变化

网络层: 控制平面 5-15

## 第5章: 提纲

### 5.1 导论

### 5.2 路由选择算法

#### □ link state

#### □ distance vector

### 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择

#### □ RIP

#### □ OSPF

### 5.4 ISP之间的路由选择: BGP

### 5.5 SDN控制平面

### 5.6 ICMP: 因特网控制报文协议

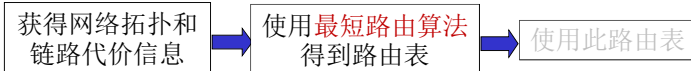
### 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层: 控制平面 5-16

## LS路由的工作过程

### 配置LS路由选择算法的路由工作过程

- 各点通过各种渠道获得**整个网络拓扑**,网络中所有链路**代价**等信息(这部分和算法没关系,属于协议和实现)
- 使用**LS路由算法**,计算本站点到其它站点的最优路径(汇集树),得到路由表
- 按照此路由表转发分组(datagram方式)
  - 严格意义上说不是路由的一个步骤
  - 分发到输入端口的网络层



网络层: 控制平面 5-17

## 链路状态路由选择(link state routing)

### LS路由的基本工作过程

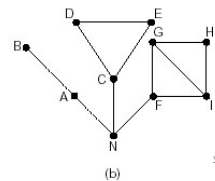
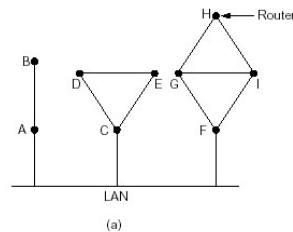
- 发现相邻节点,获知对方网络地址
- 测量到相邻节点的代价(延迟,开销)
- 组装一个LS分组,描述它到相邻节点的代价情况
- 将分组通过扩散的方法发到所有其它路由器  
以上4步让**每个**路由器获得**拓扑**和**边代价**
- 通过Dijkstra算法找出最短路径(这才是路由算法)
  - 每个节点独立算出来到其他节点(路由器=网络)的最短路径
  - 迭代算法: 第k步能够知道本节点到k个其他节点的最短路径

网络层: 控制平面 5-18

## 链路状态路由选择(link state routing)

### 1. 发现相邻节点,获知对方网络地址

- 一个路由器上电之后,向所有线路发送HELLO分组
- 其它路由器收到HELLO分组,回送应答,在应答分组中,告知自己的名字(全局唯一)
- 在LAN中,通过广播HELLO分组,获得其它路由器的信息,可以认为引入一个人工节点

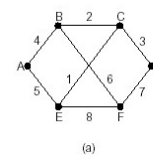


平面 5-19

## 链路状态路由选择(link state routing)

### 2. 测量到相邻节点的代价(延迟,开销)

- 实测法,发送一个分组要求对方立即响应
  - 回送一个ECHO分组
  - 通过测量时间可以估算出延迟情况
- ### 3. 组装一个分组,描述相邻节点的情况
- 发送者名称
  - 序号,年龄
  - 列表: 给出它相邻节点,和它到相邻节点的延迟



Link		State		Packets	
A	B	C	D	E	F
Seq.	Seq.	Seq.	Seq.	Seq.	Seq.
Age	Age	Age	Age	Age	Age
B 4	A 4	B 2	C 3	A 5	B 6
E 5	C 2	D 3	F 7	C 1	D 7
	F 6	E 1		F 8	E 8

(b)

制平面 5-20

## 链路状态路由选择(link state routing)

4. 将分组通过扩散的方法发到所有其它路由器
  - 顺序号:用于控制无穷的扩散,每个路由器都记录(源路由器,顺序号),发现重复的或老的就不扩散
    - ⑩ 具体问题1: 循环使用问题
    - ⑩ 具体问题2: 路由器崩溃之后序号从0开始
    - ⑩ 具体问题3: 序号出现错误
  - 解决问题的办法: 年龄字段(age)
    - ⑩ 生成一个分组时,年龄字段不为0
    - ⑩ 每个一个时间段,AGE字段减1
    - ⑩ AGE字段为0的分组将被抛弃

网络层: 控制平面 5-21

## 链路状态路由选择(link state routing)

4. 将分组通过扩散的方法发到所有其它路由器 (续)
  - 关于扩散分组的数据结构
    - ✓ Source :从哪个节点收到LS分组
    - ✓ Seq, Age: 序号, 年龄
    - ✓ Send flags: 发送标记, 必须向指定的哪些相邻站点转发LS分组
    - ✓ ACK flags: 本站点必须向哪些相邻站点发送应答
    - ✓ DATA: 来自source站点的LS分组
    - ✓ 节点B的数据结构

Source	Seq.	Age	Send flags			ACK flags			Data
A	21	60	A	C	F	A	C	F	
F	21	60	1	1	0	0	0	1	
E	21	59	0	1	0	1	0	1	
C	20	60	1	0	1	0	1	0	
D	21	59	1	0	0	0	1	1	

平面 5-22

## 链路状态路由选择(link state routing)

5. 通过Dijkstra算法找出最短路径
  - 路由器获得各站点LS分组和整个网络的拓扑
  - 通过Dijkstra算法计算出到其它各路由器的最短路径(汇集树)
  - 将计算结果安装到路由表中
- LS的应用情况
  - OSPF协议是一种LS协议,被用于Internet上
  - IS-IS(intermediate system- intermediate system): 被用于Internet主干中, Netware

这才是路由算法

网络层: 控制平面 5-23

## 链路状态路由选择(link state routing)

### □ 符号标记:

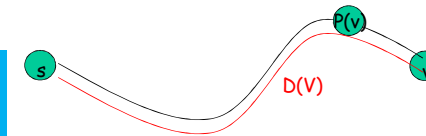
$c(i,j)$ : 从节点i 到j链路代价(初始状态下非相邻节点之间的链路代价为 $\infty$ )

$D(v)$ : 从源节点到节点V的当前路径代价(节点的代价)

$p(v)$ : 从源到节点V的路径前序节点

$N'$ : 当前已经知道最优路径的节点集合(永久节点的集合)

要计算S到其他所有节点的路由



网络层: 控制平面 5-24

## 链路状态路由选择(link state routing)

### LS路由选择算法的工作原理

- 节点标记: 每一个节点使用( $D(v), p(v)$ ) 如: (3,B)标记

⑩  $D(v)$ 从源节点由已知最优路径到达本节点的距离

⑩  $P(v)$ 前序节点来标注

### 2类节点

- 临时节点(tentative node): 还没有找到从源节点到此节点的最优路径的节点
- 永久节点(permanent node)  $N$ : 已经找到了从源节点到此节点的最优路径的节点

网络层: 控制平面 5-25

## 链路状态路由选择(link state routing)

### 初始化

- 除了源节点外,所有节点都为临时节点
- 节点代价除了与源节点代价相邻的节点外,都为 $\infty$

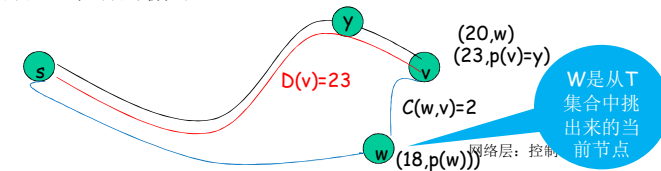
- 从所有临时节点中找到一个节点代价最小的临时节点,将之变成永久节点(当前节点) $W$

- 对此节点的所有在临时节点集合中的邻节点( $V$ )

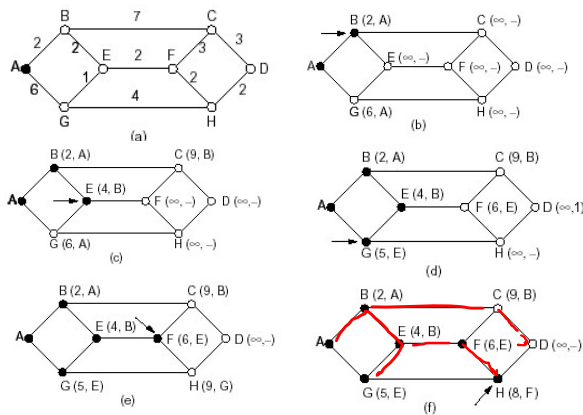
- 如  $D(v) > D(w) + c(w,v)$ , 则重新标注此点, ( $D(W)+C(W,V), W$ )

- 否则, 不重新标注

开始一个新的循环



例子:



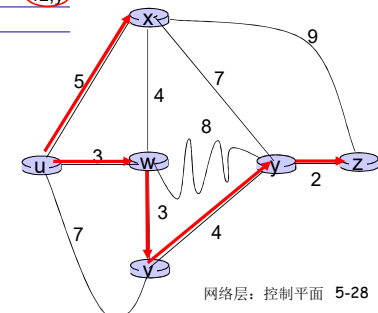
网络层: 控制平面 5-27

## Dijkstra算法的例子

Step	N'	D(v) p(v)	D(w) p(w)	D(x) p(x)	D(y) p(y)	D(z) p(z)
0	u	7,u	3,u	5,u	$\infty$	$\infty$
1	uw	6,w	5,u	11,w	$\infty$	$\infty$
2	uwvx	6,w		11,w	14,x	
3	uwxv			10,v	14,x	
4	uwxvy				12,y	
5	uwxvyz					

$$e.g., D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w,v)) = \min\{7, 3+3\} = 6$$

destination	link
v	(u,v)
x	(u,x)
y	(u,w)
w	(u,w)
z	(u,w)



网络层: 控制平面 5-28



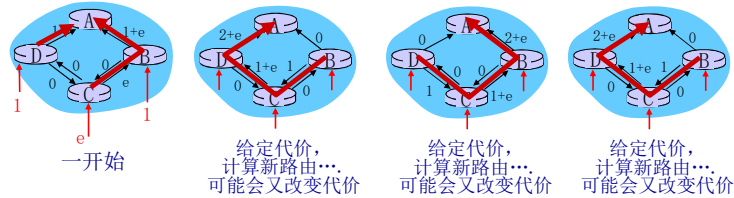
## Dijkstra算法的讨论

**算法复杂度:**  $n$  节点

- ❖ 每一次迭代: 需要检查所有不在永久集合  $N$  中节点
- ❖  $n(n+1)/2$  次比较:  $O(n^2)$
- ❖ 有很有效的实现:  $O(n \log n)$

**可能的震荡:**

- ❖ e. g., 链路代价=链路承载的流量:



网络层: 控制平面 5-29

## 第5章: 提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择: BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP: 因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层: 控制平面 5-30

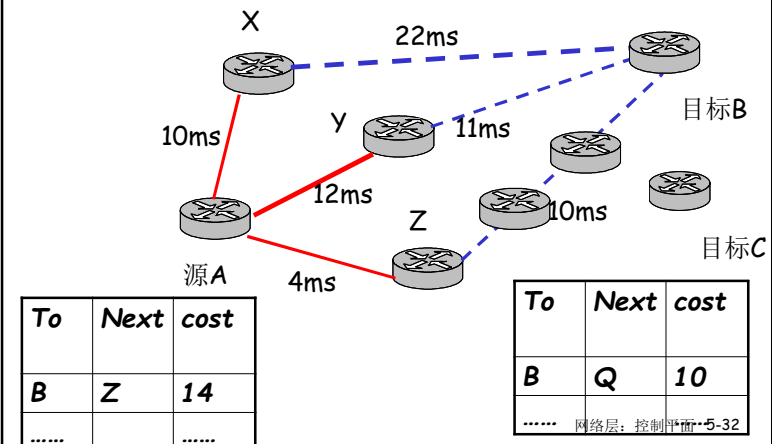
## 距离矢量路由选择(distance vector routing)

- 动态路由算法之一
- DV算法历史及应用情况
  - 1957 Bellman, 1962 Ford Fulkerson
  - 用于ARPANET, Internet(RIP)
  - DECnet, Novell, AppleTalk
- 距离矢量路由选择的基本思想
  - 各路由器维护一张路由表, 结构如图(其它代价)
  - 各路由器与相邻路由器交换路由表(待续)
  - 根据获得的路由信息, 更新路由表(待续)

To	Next	cost
目标	下个	
A	Z	14
.....		.....

网络层: 控制平面 5-31

## 距离矢量路由选择(distance vector routing)





## 距离矢量路由选择(distance vector routing)

### □ 代价及相邻节点间代价的获得

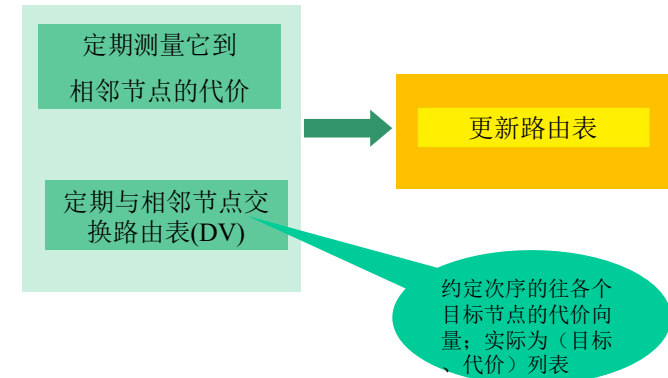
- ✓ 跳数(hops), 延迟(delay), 队列长度
- ✓ 相邻节点间代价的获得: 通过实测

### □ 路由信息的更新

- ✓ 根据实测 得到本节点A到相邻站点的代价 (如:延迟)
- ✓ 根据各相邻站点声称它们到目标站点B的代价
- ✓ 计算出本站点A经过各相邻站点到目标站点B的代价
- ✓ 找到一个最小的代价, 和相应的下一个节点Z, 到达节点B经过此节点Z, 并且代价为A-Z-B的代价
- ✓ 其它所有的目标节点一个计算法

网络层: 控制平面 5-33

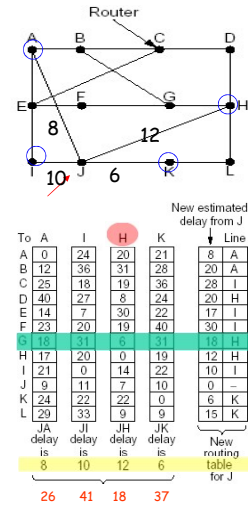
## 距离矢量路由选择(distance vector routing)



网络层: 控制平面 5-34

## 距离矢量路由: 例子1

- 以当前节点J为例, 相邻节点A, I, H, K
- J测得到A, I, H, K的延迟为 8ms, 10ms, 12ms, 6ms
- 通过交换DV, 从A, I, H, K获得到它们到G的延迟为 18ms, 31ms, 6ms, 31ms
- 因此从J经过A, I, H, K到G的延迟为 26ms, 41ms, 18ms, 37ms
- 将到G的路由表更新为18ms, 下一跳为: H
- 其它目标一样, 除了本节点J



网络层: 控制平面 5-35

## 距离矢量算法

*Bellman-Ford 方程 (动态规划)*

设

$d_x(y) :=$  从x到y的最小路径代价

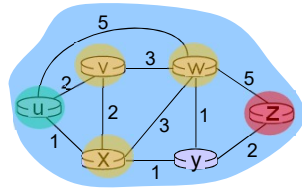
那么

$$d_x(y) = \min_v \{ c(x, v) + d_v(y) \}$$

从邻居v到目标y的代价  
x到邻居v的代价  
取所有x的邻居取最小的v

网络层: 控制平面 5-36

## Bellman-Ford例子



明显的,  $d_v(z) = 5$ ,  $d_x(z) = 3$ ,  $d_w(z) = 3$

由B-F 方程得到:

$$\begin{aligned} d_u(z) &= \min \{ c(u,v) + d_v(z), \\ &\quad c(u,x) + d_x(z), \\ &\quad c(u,w) + d_w(z) \} \\ &= \min \{ 2 + 5, \\ &\quad 1 + 3, \\ &\quad 5 + 3 \} = 4 \end{aligned}$$

那个能够达到目标z最小代价的节点x, 就在到目标节点的下一条路径上, 在转发表中使用

网络层: 控制平面 5-52

## 距离矢量算法

- $D_x(y)$  = 节点x到y代价最小值的估计
  - x 节点维护距离矢量  $D_x = [D_x(y): y \in N]$
- 节点x:
  - 知道到所有邻居v的代价:  $c(x,v)$
  - 收到并维护一个它邻居的距离矢量集
  - 对于每个邻居, x 维护  $D_v = [D_v(y): y \in N]$

网络层: 控制平面 5-53

## 距离矢量算法

### 核心思路:

- ❖ 每个节点都将自己的距离矢量估计值传送给邻居, 定时或者DV有变化时, 让对方去算
- ❖ 当x从邻居收到DV时, 自己运算, 更新它自己的距离矢量
  - ❖ 采用B-F equation:  $D_x(y) \leftarrow \min_v \{ c(x,v) + D_v(y) \}$  对于每个节点  $y \in N$   
 $x \rightarrow y$  的代价     $x \rightarrow$  邻居v的代价    v声称到y的代价
- ❖  $D_x(y)$  估计值最终收敛于实际的最小代价值  $d_x(y)$ 
  - ❖ 分布式、迭代算法

网络层: 控制平面 5-54

## 距离矢量算法

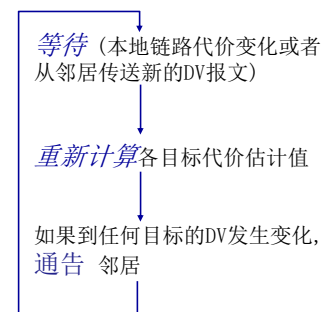
异步式, 迭代: 每次本地迭代被以下事件触发:

- 本地链路代价变化了
- 从邻居来了DV的更新消息

### 分布式:

- 每个节点只是在自己的DV改变之后向邻居通告
  - 然后邻居们在有必要的时候通知他们的邻居

### 每个节点:



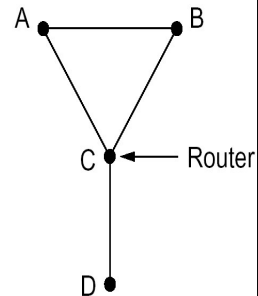
网络层: 控制平面 5-55



## 距离矢量路由选择

### □ 水平分裂(split horizon)算法

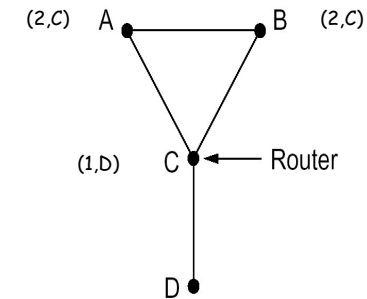
- 水平分裂的问题:在某些拓扑形式下会失败(存在环路)
- 例子:
  - ✓ A,B到D的距离为2, C到D的距离为1
  - ✓ 如果C-D路径失败
  - ✓ C获知到D为INF,从A,B获知到D的距离为INF,因此C认为D不可达
  - ✓ A从C获知D的距离为INF,但从B处获知它到D的距离为2,因此A到B的距离为3,从B走
  - ✓ B也有类似的问题
  - ✓ 经过无限次之后,A和B都知道到D的距离为INF



网络层: 控制平面 5-45

## 距离矢量路由选择

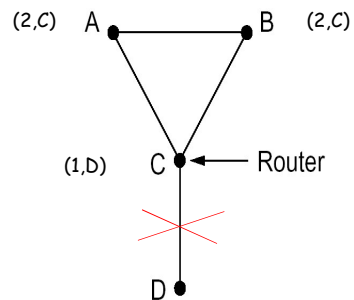
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层: 控制平面 5-46

## 距离矢量路由选择

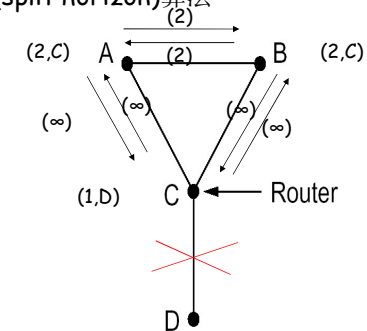
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层: 控制平面 5-47

## 距离矢量路由选择

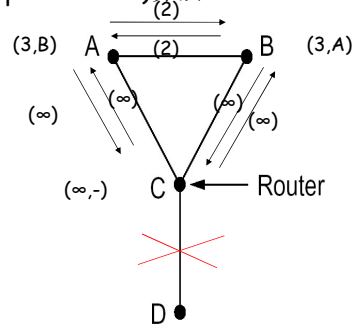
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层: 控制平面 5-48

## 距离矢量路由选择

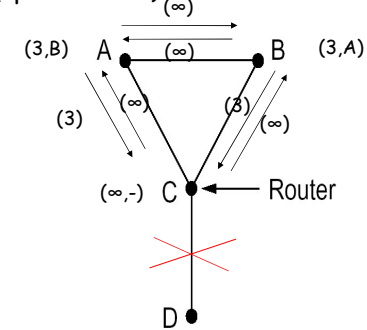
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层：控制平面 5-49

## 距离矢量路由选择

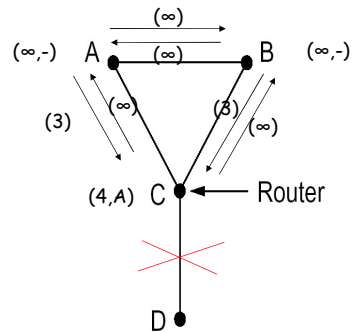
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层：控制平面 5-50

## 距离矢量路由选择

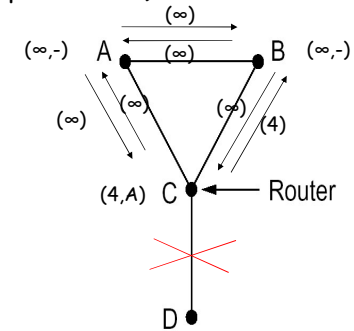
### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层：控制平面 5-51

## 距离矢量路由选择

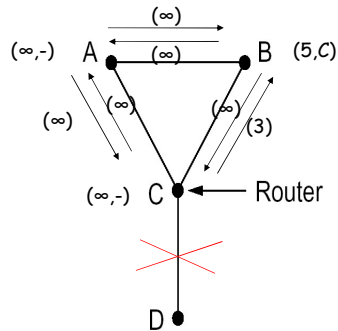
### □ 水平分裂(split horizon)算法



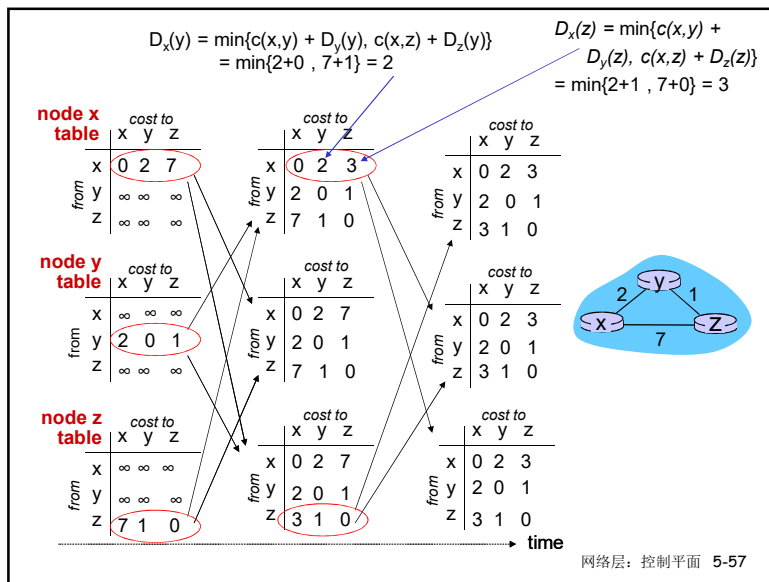
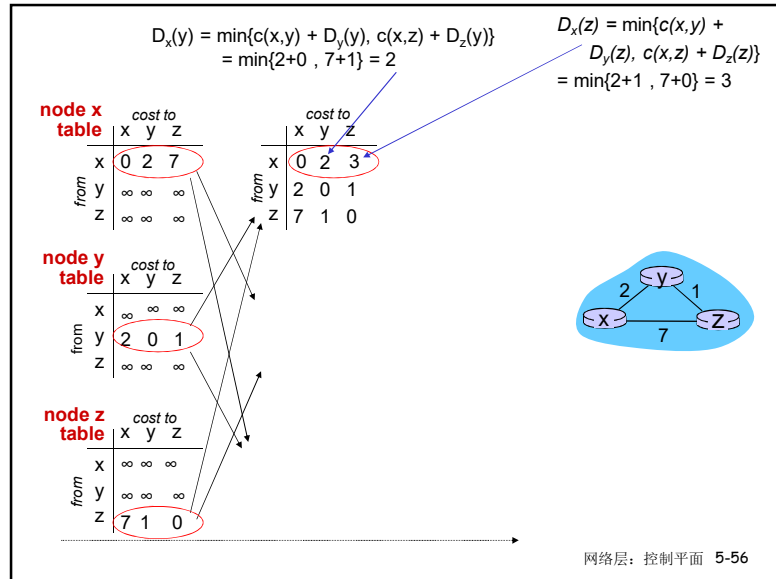
网络层：控制平面 5-52

## 距离矢量路由选择

### □ 水平分裂(split horizon)算法



网络层：控制平面 5-53



## LS 和 DV 算法的比较

### 消息复杂度 (DV胜出)

- LS: 有  $n$  节点,  $E$  条链路, 发送报文  $O(nE)$  个

- 局部的路由信息; 全局传播

- DV: 只和邻居交换信息

- 全局的路由信息, 局部传播

### 健壮性: 路由器故障会发生什么 (LS胜出)

#### LS:

- 节点会通告不正确的链路代价
- 每个节点只计算自己的路由表
- 错误信息影响较小, 局部, 路由较健壮

#### DV:

- DV 节点可能通告对全网所有节点的不正确路径代价
- 距离矢量
- 每一个节点的路由表可能被其它节点使用
- 错误可以扩散到全网

### 收敛时间 (LS胜出)

- LS:  $O(n^2)$  算法

- 有可能震荡

- DV: 收敛较慢

- 可能存在路由环路

- count-to-infinity 问题

2种路由选择算法都有其优缺点, 而且在互联网上都有应用

网络层：控制平面 5-58

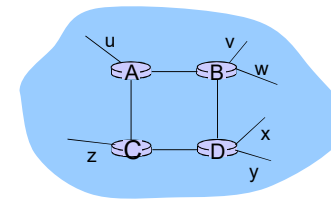
## 第5章：提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择：BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP：因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-3

## RIP (Routing Information Protocol)

- 在 1982年发布的BSD-UNIX 中实现
- Distance vector 算法
  - 距离矢量: 每条链路cost=1, # of hops (max = 15 hops) 跳数
  - DV每隔30秒和邻居交换DV, 通告
  - 每个通告包括: 最多25个目标子网



从路由器A到目标子网:

subnet	hops
u	1
v	2
w	2
x	3
y	3
z	2

网络层：控制平面 5-58

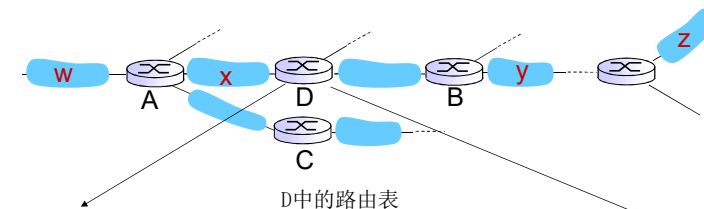
## RIP 通告 (advertisements)

- DV: 在邻居之间每30秒交换通告报文
  - 定期, 而且在改变路由的时候发送通告报文
  - 在对方的请求下可以发送通告报文
- 每一个通告: 至多AS内部的25个目标网络的DV
  - 目标网络+跳数

一次公告最多25个  
子网  
最大跳数为16

网络层：控制平面 5-59

## RIP: 例子



D中的路由表

destination subnet	next router	# hops to dest
w	A	2
y	B	2
z	B	7
x	--	1
....	....	....

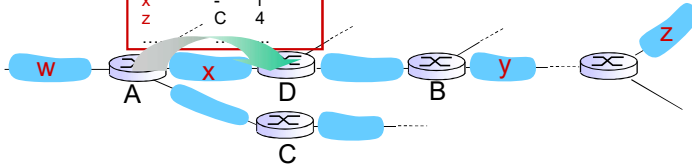
网络层：控制平面 5-60



## RIP: 例子

A 发给D距离矢量

dest	next hops
w	- 1
x	- 1
z	C 4



routing table in router D

destination subnet	next router	# hops to dest
w	A	2
y	B	2
z	<del>B</del> A	<del>7</del> 5
x	--	1
....	....	....

网络层：控制平面 5-61

## RIP: 链路失效和恢复

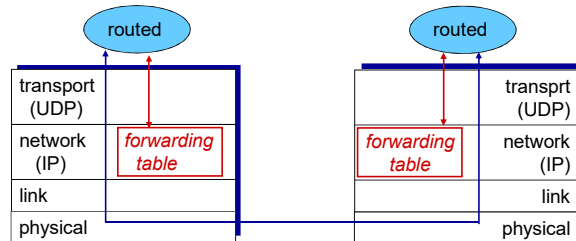
如果180秒没有收到通告信息-->邻居或者链路失效

- 发现经过这个邻居的路由已失效
- 新的通告报文会传递给邻居
- 邻居因此发出新的通告 (如果路由变化的话)
- 链路失效快速(?)地在整网中传输
- 使用**毒性逆转 (poison reverse)** 阻止ping-pong回路 (不可达的距离: 跳数无限 = 16 段)

网络层：控制平面 5-62

## RIP 进程处理

- RIP 以应用进程的方式实现: route-d (daemon)
- 通告报文通过UDP报文传送, 周期性重复
- 网络层的协议使用了传输层的服务, 以应用层实体的方式实现



网络层：控制平面 5-63

## 第5章：提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择: BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP: 因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-64

## OSPF (Open Shortest Path First)

- ❑ “open”：标准可公开获得
- ❑ 使用LS算法
  - LS 分组在网络中（一个AS内部）分发
  - 全局网络拓扑、代价在每一个节点中都保持
  - 路由计算采用Dijkstra算法
- ❑ OSPF通告信息中携带：每一个邻居路由器一个表项
- ❑ 通告信息会传遍AS全部（通过泛洪）
  - 在IP数据报上直接传送OSPF报文（而不是通过UDP和TCP）
- ❑ IS-IS路由协议：几乎和OSPF一样

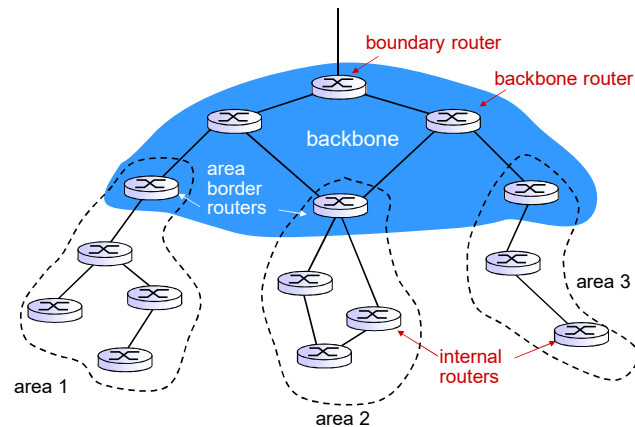
网络层：控制平面 5-65

## OSPF “高级” 特性(在RIP中的没有的)

- ❑ 安全：所有的OSPF报文都是经过认证的（防止恶意的攻击）
- ❑ 允许有多个代价相同的路径存在（在RIP协议中只有一个）
- ❑ 对于每一个链路，对于不同的TOS有多重代价矩阵
  - 例如：卫星链路代价对于尽力而为的服务代价设置比较低，对实时服务代价设置的比较高
  - 支持按照不同的代价计算最优路径，如：按照时间和延迟分别计算最优路径
- ❑ 对单播和多播的集成支持：
  - Multicast OSPF (MOSPF) 使用相同的拓扑数据库，就像在OSPF中一样
- ❑ 在大型网络中支持层次性OSPF

网络层：控制平面 5-66

## 层次化的OSPF路由



网络层：控制平面 5-67

## 层次性的OSPF路由

- ❑ 2个级别的层次性：本地，骨干
  - 链路状态通告仅仅在本地区域Area范围内进行
  - 每一个节点拥有本地区域的拓扑信息；
    - ⑩ 关于其他区域，知道去它的方向，通过区域边界路由器（最短路径）
- ❑ 区域边界路由器：“汇总（聚集）”到自己区域内网络的距离，向其它区域边界路由器通告。
- ❑ 骨干路由器：仅仅在骨干区域内，运行OSPF路由
- ❑ 边界路由器：连接其它的AS's。

网络层：控制平面 5-68

## 第5章：提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择：BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP：因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-69

## 层次路由

- 一个平面的路由
  - 一个网络中的所有路由器的地位一样
  - 通过LS, DV, 或者其他路由算法, 所有路由器都要知道其他所有路由器(子网)如何走
  - 所有路由器在一个平面
- 平面路由的问题
  - 规模巨大的网络中, 路由信息的存储、传输和计算代价巨大
    - ⑩ DV: 距离矢量很大, 且不能够收敛
    - ⑩ LS: 几百万个节点的LS分组的泛洪传输, 存储以及最短路径算法的计算
  - 管理问题:
    - ⑩ 不同的网络所有者希望按照自己的方式管理网络
    - ⑩ 希望对外隐藏自己网络的细节
    - ⑩ 当然, 还希望和其它网络互联

网络层：控制平面 5-70

## 层次路由

- 路由变成了: 2个层次路由
  - AS内部路由: 在同一个AS内路由器运行相同的路由协议
    - ⑩ “intra-AS” routing protocol: 内部网关协议
    - ⑩ 不同的AS可能运行着不同的内部网关协议
    - ⑩ 能够解决规模和管理问题
    - ⑩ 如: RIP, OSPF, IGRP
    - ⑩ 网关节路由器: AS边缘路由器, 可以连接到其他AS
  - AS间运行AS间路由协议
    - ⑩ “inter-AS” routing protocol: 外部网关协议
    - ⑩ 解决AS之间的路由问题, 完成AS之间的互联互通
- 层次路由: 将互联网分成一个个AS(路由器区域)
  - 某个区域内的路由器集合, 自治系统 “autonomous systems” (AS)
  - 一个AS用AS Number (ASN)唯一标示
  - 一个ISP可能包括1个或者多个AS

网络层：控制平面 5-71

## 层次路由的优点

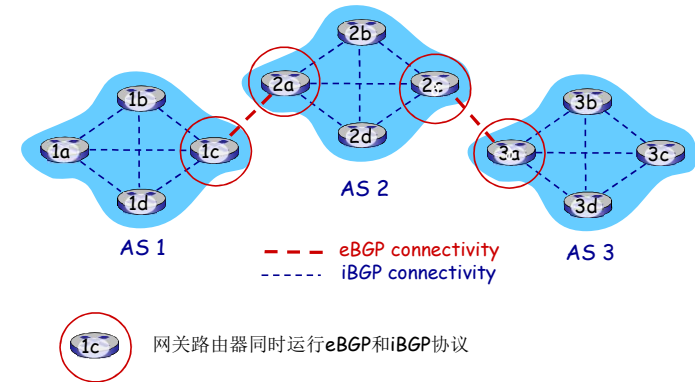
- 解决了规模问题
  - 内部网关协议解决: AS内部数量有限的路由器相互到达的问题, AS内部规模可控
    - ⑩ 如AS节点太多, 可分割AS, 使得AS内部的节点数量有限
  - AS之间的路由的规模问题
    - ⑩ 增加一个AS, 对于AS之间的路由从总体上来说, 只是增加了一个节点=子网(每个AS可以用一个点来表示)
    - ⑩ 对于其他AS来说只是增加了一个表项, 就是这个新增的AS如何走的问题
    - ⑩ 扩展性强: 规模增大, 性能不会减得太多
- 解决了管理问题
  - 各个AS可以运行不同的内部网关协议
  - 可以使自己网络的细节不向外透露

网络层：控制平面 5-72

## 互联网AS间路由：BGP

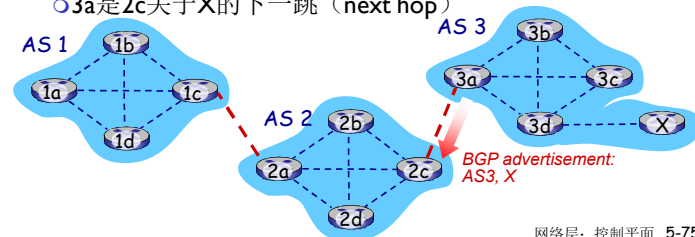
- **BGP (Border Gateway Protocol):** 自治区域间路由协议“事实上的”标准
  - “将互联网各个AS粘在一起的胶水”
- BGP 提供给每个AS以以下方法：
  - **eBGP:** 从相邻的ASes那里获得子网可达信息
  - **iBGP:** 将获得的子网可达信息传遍到AS内部的所有路由器
  - 根据子网可达信息和**策略**来决定到达子网的“好”路径
- 允许子网向互联网其他网络通告“**我在这里**”
- 基于距离矢量算法（路径矢量）
  - 不仅仅是距离矢量，还包括到达各个目标网络的详细路径（AS序号的列表）能够避免简单DV算法的路由环路问题 网络层：控制平面 5-73

## eBGP, iBGP 连接



## BGP基础

- **BGP 会话:** 2个BGP路由器(“peers”)在一个半永久的TCP连接上交换BGP报文：
  - 通告向不同目标子网前缀的“路径”（BGP是一个“路径矢量”协议）
- 当AS3网关路由器3a向AS2的网关路由器2c通告路径：**AS3,X**
  - 3a参与AS内路由运算，知道本AS所有子网X信息
  - 语义上：AS3向AS2**承诺**，它可以向子网X转发数据报
  - 3a是2c关于X的下一跳（next hop）

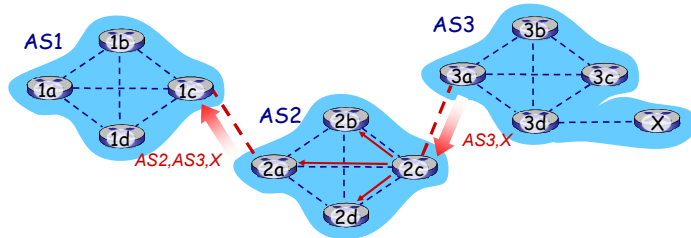


## 路径的属性& BGP 路由

- 当通告一个子网前缀时，通告包括 BGP 属性
  - **prefix + attributes = “route”**
- 2个重要的属性：
  - **AS-PATH:** 前缀的通告所经过的AS列表: AS 67 AS 17
    - 检测环路：多路径选择
    - 在向其它AS转发时，需要将自己的AS号加在路径上
  - **NEXT-HOP:** 从当前AS到下一跳AS有多个链路，在NETX-HOP属性中，告诉对方通过那个I转发。
  - 其它属性：路由偏好指标，如何被插入的属性
- 基于**策略**的路由：
  - 当一个**网关路由器**收到了一个路由通告，使用**输入策略**来接受或过滤（accept/decline.）
    - 过滤原因例1：不想经过某个AS，转发某些前缀的分组
    - 过滤原因例2：已经有了一条往某前缀的偏好路径
  - 策略也决定了是否向它别的邻居**通告**收到的这个路由信息

网络层：控制平面 5-76

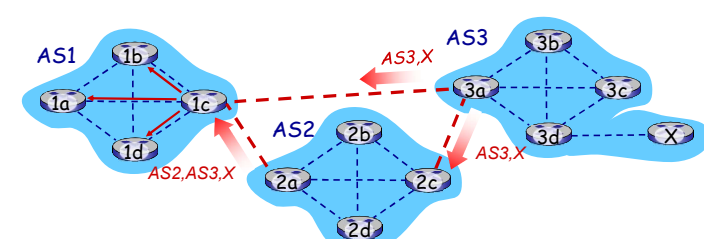
## BGP 路径通告



- 路由器AS2.2c从AS3.3a接收到的**AS3,X**路由通告 (通过 eBGP)
- 基于AS2的输入策略, AS2.2c决定接收AS3,X的通告, 而且通过iBGP向AS2的所有路由器进行通告
- 基于AS2的策略, AS2路由器2a通过eBGP向AS1.1c路由器通告**AS2,AS3,X**路由信息
  - 路径上加上了 AS2自己作为AS序列的一跳

网络层: 控制平面 5-77

## BGP 路径通告



网关路由器可能获取有关一个子网X的多条路径, 从多个eBGP会话上:

- AS1 网关路由器1c从2a学习到路径: **AS2, AS3, X**
- AS1网关路由器1c从3a处学习到路径AS3, X
- 基于策略, AS1路由器1c选择了路径: **AS3, X**, 而且通过iBGP告诉所有AS1内部的路由器

网络层: 控制平面 5-78

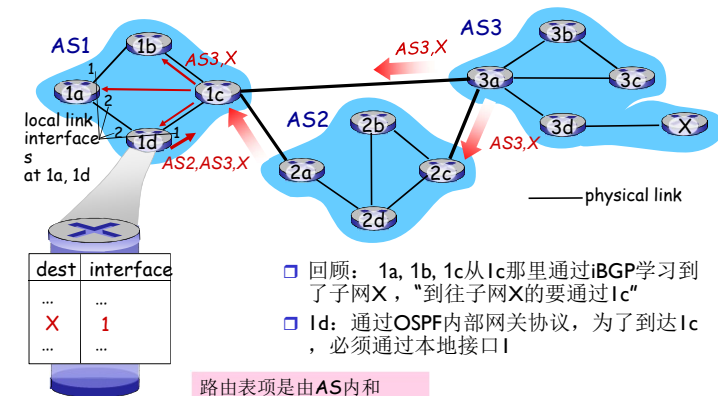
## BGP报文

- 使用TCP协议交换BGP报文.
- BGP 报文:
  - OPEN: 打开TCP连接, 认证发送方
  - UPDATE: 通告新路径 (或者撤销原路径)
  - KEEPALIVE: 在没有更新时保持连接, 也用于对OPEN 请求确认
  - NOTIFICATION: 报告以前消息的错误, 也用来关闭连接

网络层: 控制平面 5-79

## BGP, OSPF, 转发表表项

Q: 路由器是如何设置到这些远程子网前缀的转发表表项的?



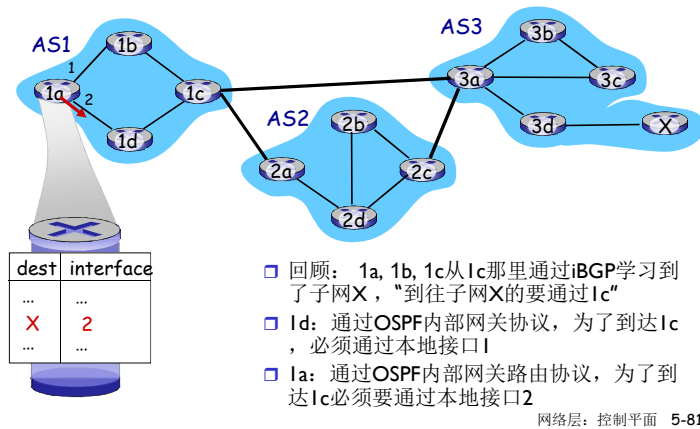
- 回顾: 1a, 1b, 1c从1c那里通过iBGP学习到了子网X, "到往子网X的要通过1c"
- 1d: 通过OSPF内部网关协议, 为了到达1c, 必须通过本地接口1

路由表项是由AS内和AS间的路由共同决定的

网络层: 控制平面 5-80

## BGP, OSPF, 转发表表项

Q: 路由器是如何设置到这些远程子网前缀的转发表表项的?

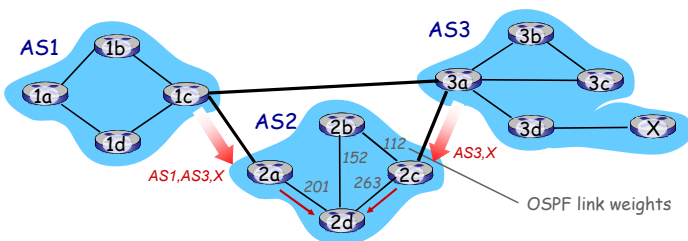


## BGP 路径选择

- 路由器可能获得一个网络前缀的多个路径, 路由器必须进行路径的选择, 路由选择可以基于:
  1. 本地偏好值属性: 偏好策略决定
  2. 最短AS-PATH: AS的跳数
  3. 最近的NEXT-HOP路由器: 热土豆路由
  4. 附加的判据: 使用BGP标示
- 一个前缀对应着多种路径, 采用消除规则直到留下一条路径

网络层: 控制平面 5-82

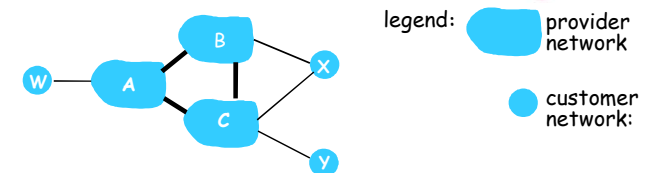
## 热土豆路由



- 2d通过iBGP获知, 它可以通过2a或者2c到达X
- **热土豆策略**: 选择具备最小内部区域代价的网关作为往X的出口 (如: 2d选择2a, 即使往X可能有比较多的AS跳数): 不要操心域间的代价!

网络层: 控制平面 5-83

## BGP: 通过路径通告执行策略



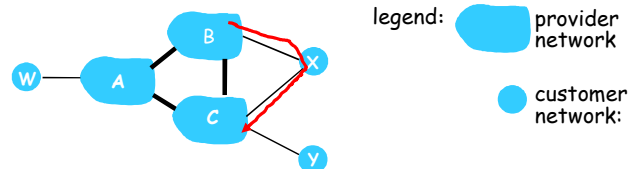
假设一个ISP只想路由流量到/去往它的客户网络 (不想承载其他ISPs之间的流量, 即不通告: 不是去往我的客户, 也不是来自我的客户)

- A 向B和C通告路径Aw
- B选择不向C通告BAw:
  - B从CBAw的路由上无法获得收益, 因为C, A, w都不是B的客户
  - C从而无法获知 CBAw路径的存在: 每个ISP感知到的网络和真实不一致
- C可能会通过 CAw (而不是使用B) 最终路由到w

网络层: 控制平面 5-84



## BGP: 通过路径通告执行策略



假设一个ISP只想路由流量到/去往它的客户网络 (不想承载其他ISPs之间的流量, 即不通告: 不是去往我的客户, 也不是来自我的客户)

- A,B,C 是提供商网络:
- X,W,Y 是桩网络 (stub networks) 或者叫端网络
- X 是双重接入的, 多宿主网络, 接入了2个网络
- 策略强制让X:
  - X不想路由从B通过X到C的分组
  - 因而X就不通告给B, 它实际上可以路由到C

网络层: 控制平面 5-85

## 为什么内部网关协议和外部网关协议如此不同?

### 策略:

- Inter-AS: 管理员需要控制通信路径, 谁在使用它的网络进行数据传输;
- Intra-AS: 一个管理者, 所以无需策略;
  - AS内部的各子网的主机尽可能地利用资源进行快速路由

### 规模:

- AS间路由必须考虑规模问题, 以便支持全网的数据转发
- AS内部路由规模不是一个大的问题
  - 如果AS太大, 可将此AS分成小的AS; 规模可控
  - AS之间只不过多了一个点而已
  - 或者AS内部路由支持层次性, 层次性路由节约了表空间, 降低了更新的数据流量

### 性能:

- Intra-AS: 关注性能
- Inter-AS: 策略可能比性能更重要

网络层: 控制平面 5-86

## 第5章: 提纲

### 5.1 导论

### 5.2 路由选择算法

- link state
- distance vector

### 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择

- RIP
- OSPF

### 5.4 ISP之间的路由选择: BGP

### 5.5 SDN控制平面

### 5.6 ICMP: 因特网控制报文协议

### 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层: 控制平面 5-87

## Software defined networking (SDN)

- 互联网络网络层: 历史上都是通过分布式、每个路由器的实现

- 单个路由器包含了: 交换设备硬件、私有路由器OS (如: 思科IOS) 和其上运行的互联网标准协议(IP, RIP, IS-IS, OSPF, BGP) 的私有实现
- 需要不同的中间盒来实现不同网络层功能: 防火墙, 负载均衡设备和NAT...

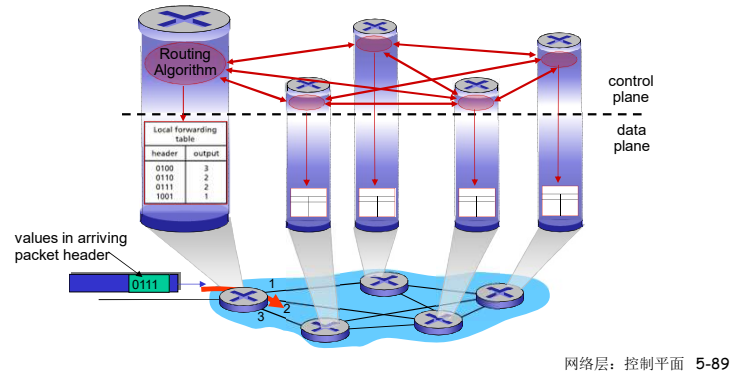
- ~2005: 点燃重新思考互联网控制平面的兴趣

网络层: 控制平面 5-88



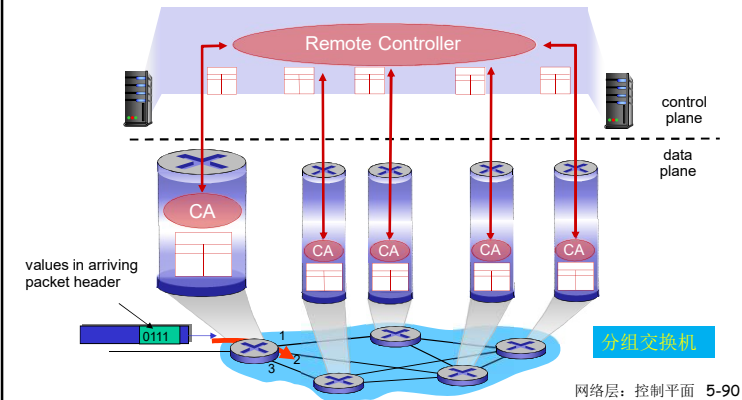
## 传统方式：每-路由器 (Per-router) 控制平面

在**每一个路由器**中的单独路由器算法元件，在控制平面进行交互



## SDN方式：逻辑上集中的控制平面

一个不同的（通常是远程的）控制器与本地控制代理（CAs）交互



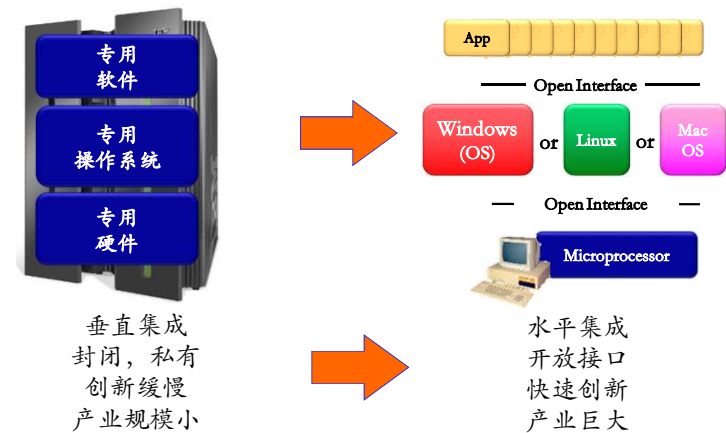
## Software defined networking (SDN)

为什么需要一个**逻辑上集中**的控制平面？

- ❑ 网络管理更加容易：避免路由器的错误配置，对于通信流的弹性更好
- ❑ 基于流表的转发（回顾一下OpenFlow API），允许“可编程”的路由器
  - 集中式“编程”更加容易：集中计算流表然后分发
  - 传统方式分布式“编程”困难：在每个单独的路由器上分别运行分布式的算法，得到转发表（部署和升级代价低）
    - ⑥ 而且要求各分布式计算出的转发表都得基本正确
- ❑ 控制平面的开放实现（非私有）
  - 新的竞争生态

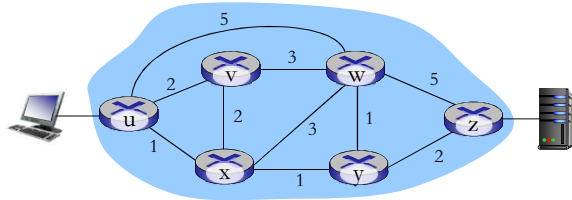
网络层：控制平面 5-91

## 类比：主框架到PC的演变



网络层：控制平面 5-92

## 流量工程: 传统路由比较困难



Q: 网管如果需要u到z的流量走uvwz, x到z的流量走xwyz, 怎么办?

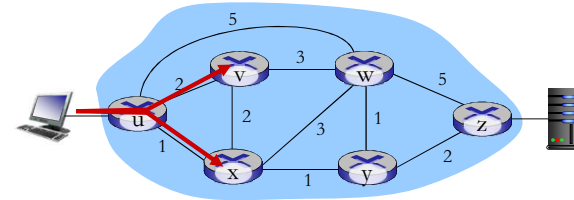
A: 需要定义链路的代价, 流量路由算法以此运算 (IP路由面向目标, 无法操作) (或者需要新的路由算法)!

*只是链路权重控制旋钮, 错!*

*不仅仅链路代价是控制旋钮, 控制平面的策略也是*

网络层: 控制平面 5-93

## 流量工程: 困难

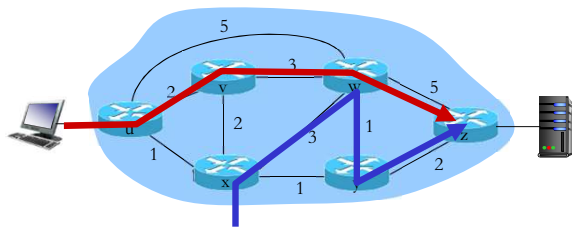


Q: 如果网管需要将u到z的流量分成2路: uvwz 和uxyz (负载均衡), 怎么办? (IP路由面向目标)

A: 无法完成(在原有体系下只有使用新的路由选择算法, 而在全网部署新的路由算法是个大的事情)

网络层: 控制平面 5-94

## 流量工程: 困难



Q: 如果需要w对蓝色的和红色的流量采用不同的路由, 怎么办?

A: 无法操作 (基于目标的转发, 采用LS, DV 路由)

网络层: 控制平面 5-95

## SDN特点

4. 可编程控制应用

在控制器之上以网络应用形式实现各种网络功能

routing access control ... load balance

3. 控制平面功能在数据交换设备之外实现

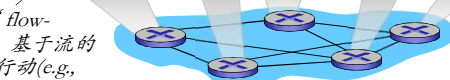
Remote Controller

control plane

2. 控制平面和数据平面的分离

data plane

1. 通用“flow-based”基于流的匹配+行动(e.g., OpenFlow)

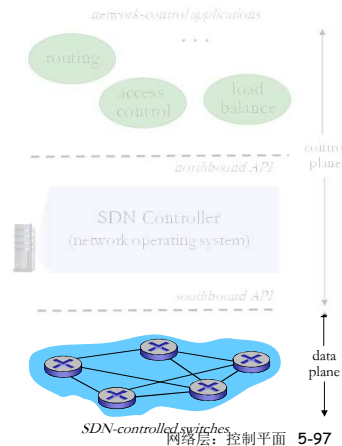


网络层: 控制平面 5-96

## SDN 架构: 数据平面交换机

### 数据平面交换机

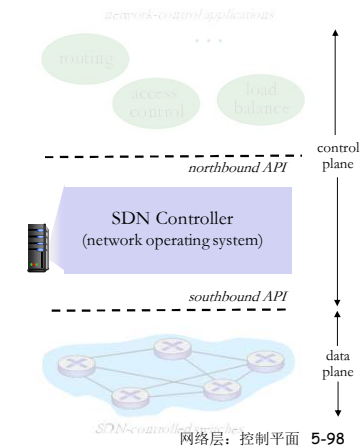
- 快速, 简单, 商业化交换设备采用硬件实现**通用**转发功能
- 流表被控制器计算和安装
- 基于南向API (例如OpenFlow), SDN控制器访问基于流的交换机
  - 定义了哪些可以被控制哪些不能
- 也定义了和控制器的协议 (e.g., OpenFlow)



## SDN 架构: SDN控制器

### SDN 控制器(网络OS):

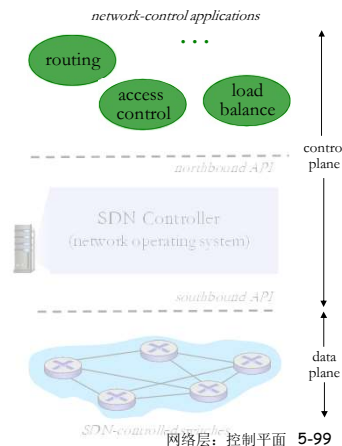
- 维护网络状态信息
- 通过上面的北向API和网络控制应用交互
- 通过下面的南向API和网络交换机交互
- 逻辑上集中, 但是在实现上通常由于性能、可扩展性、容错性以及鲁棒性采用分布式方法实现



## SDN 架构: 控制应用

### 网络控制应用:

- 控制的大脑: 采用下层提供的服务 (SDN控制器提供的API), 实现网络功能
  - 路由器 交换机
  - 接入控制 防火墙
  - 负载均衡
  - 其他功能
- 非绑定: 可以被第三方提供, 与控制器厂商以通常上不同, 与分组交换机厂商也可以不同

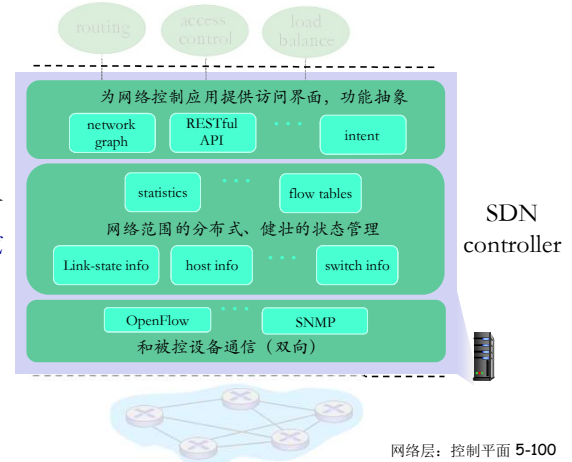


## SDN控制器里的元件

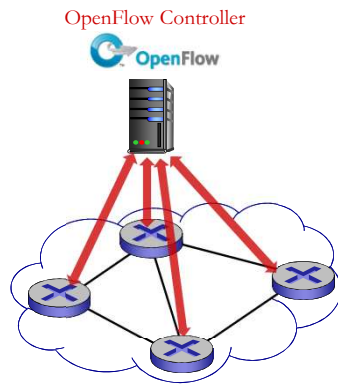
网络控制应用的  
界面层 抽象API

网络范围的状态  
管理层: 网络链路、交互设备和服  
务的状态: 分布式  
数据库

通信层: SDN控  
制器和SDN交换  
机之间进行通信



## OpenFlow 协议



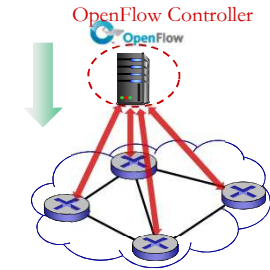
- 控制器和SDN交换机交互的协议
- 采用TCP 来交换报文
  - 加密可选
- 3种OpenFlow报文类型
  - 控制器>交换机
  - 异步（交换机>控制器）
  - 对称 (misc)

网络层：控制平面 5-101

## OpenFlow: 控制器-交换机报文

一些关键的控制器到交换机的报文

- **特性**: 控制器**查询**交换机特性, 交换机应答
- **配置**: 交换机**查询/设置**交换机的配置参数
- **修改状态**: 增加删除修改OpenFlow表中的流表
- **packet-out**: 控制器可以将分组通过特定的端口发出

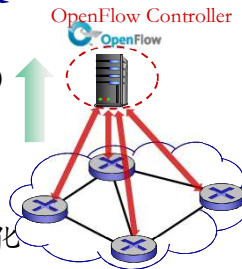


网络层：控制平面 5-102

## OpenFlow: 交换机到控制器的报文

一些关键的交换机到控制器的报文

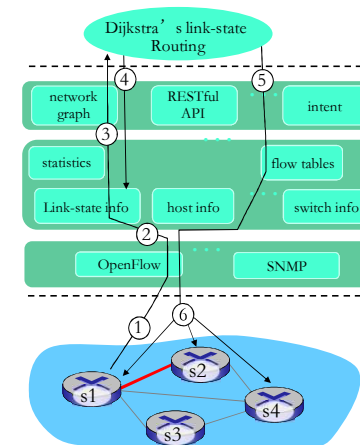
- **分组进入**: 将分组（和它的控制）传给控制器，见来自控制器的packet-out报文
- **流移除**: 在交换机上删除流表项
- **端口状态**: 通告控制器端口的变化



幸运的是, 网络管理员不需要直接通过创建/发送流表来编程交换机, 而是采用在控制器上的app自动运算和配置

网络层：控制平面 5-103

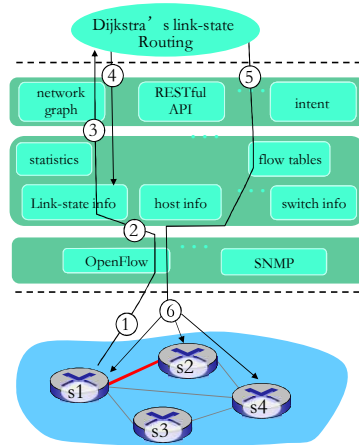
## SDN: 控制/数据平面交互的例子



- ① S1, 经历了链路失效, 采用OpenFlow报文通告控制器: 端口状态报文
- ② SDN 控制器接收OpenFlow报文, 更新链路状态信息
- ③ Dijkstra路由算法应用被调用（前面注册过这个状态变化消息）
- ④ Dijkstra路由算法访问控制器中的网络拓扑信息, 链路状态信息计算新路由

网络层：控制平面 5-104

## SDN: 控制/数据平面交互的例子

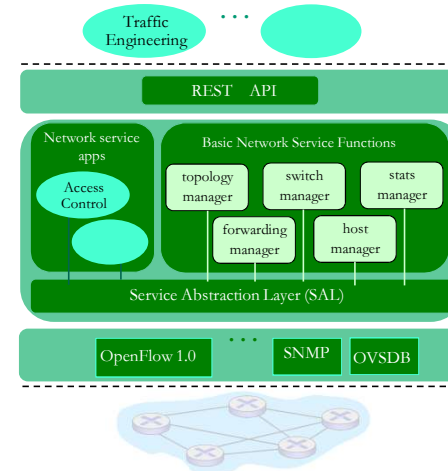


⑤ 链路状态路由app和SDN控制器中流表计算元件交互，计算出新的所需流表

⑥ 控制器采用OpenFlow在交换机上安装新的需要更新的流表

网络层：控制平面 5-105

## OpenDaylight (ODL) 控制器



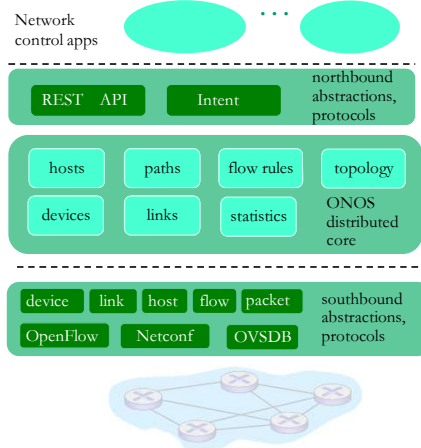
■ ODL Lithium 控制器

■ 网络应用可以在SDN控制内或者外面

■ 服务抽象层SAL：和内部以及外部的应用以及服务进行交互

网络层：控制平面 5-106

## ONOS 控制器



■ 控制应用和控制器分离（应用app在控制器外部）

■ 意图框架：服务的高级规范：描述什么而不是如何

■ 相当多的重点聚焦在分布式核心上，以提高服务的可靠性，性能的可扩展性

网络层：控制平面 5-107

## SDN: 面临的挑战

- 强化控制平面：可信、可靠、性能可扩展性、安全的分布式系统
  - 对于失效的鲁棒性：利用为控制平面可靠分布式系统的强大理论
  - 可信任，安全：从开始就进行铸造
- 网络、协议满足特殊任务的需求
  - e.g., 实时性，超高可靠性、超高安全性
- 互联网络范围内的扩展性
  - 而不是仅仅在一个AS的内部部署，全网部署

网络层：控制平面 5-108

## 第5章：提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择：BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP：因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-109

## ICMP: Internet Control Message Protocol

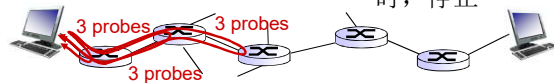
- 由主机、路由器、网关用于传达网络层控制信息
  - 错误报告：主机不可到达、网络、端口、协议
  - Echo 请求和回复 (ping)
- ICMP处在网络层，但是在IP协议的上面
  - ICMP消息由IP数据报承载
- ICMP 报文：
  - 类型
  - 编码
  - 加上IP数据报的头8B
    - 第一个导致该ICMP报文的IP数据报

Type	Code	description
0	0	echo reply (ping)
3	0	dest. network unreachable
3	1	dest host unreachable
3	2	dest protocol unreachable
3	3	dest port unreachable
3	6	dest network unknown
3	7	dest host unknown
4	0	source quench (congestion control - not used)
8	0	echo request (ping)
9	0	route advertisement
10	0	router discovery
11	0	TTL expired
12	0	bad IP header

网络层：控制平面 5-110

## Traceroute and ICMP

- 源主机发送一系列UDP段给目标主机
  - 第一个：TTL=1
  - 第二个：TTL=2, etc.
  - 一个不可达的端口号
- 当nth数据报到达nth路由器
  - 路由器抛弃数据报
  - 然后发送一个给源的ICMP报文 (type 11, code 0)
  - 报文包括了路由器的名字和IP地址
- 当ICMP报文到达，源端计算RTT
- 对于一个nTraceroute做3次
- UDP段最终到达目标主机
- 目标返回给源主机ICMP“端口不可达”报文 (type 3, code 3)
- 当源主机获得这个报文时，停止



网络层：控制平面 5-111

## 第5章：提纲

- 5.1 导论
- 5.2 路由选择算法
  - link state
  - distance vector
- 5.3 因特网中自治系统内部的路由选择
  - RIP
  - OSPF
- 5.4 ISP之间的路由选择：BGP
- 5.5 SDN控制平面
- 5.6 ICMP：因特网控制报文协议
- 5.7 网络管理和SNMP(略)

网络层：控制平面 5-112



## 什么是网络管理?

- ❑ 自治系统 (autonomous systems, aka "network"): 1000多个相互的软件和硬件部件
- ❑ 其他复杂系统也需要被监视和控制:
  - 喷气飞机
  - 核电站
  - 其他例子?



“网络管理”包括了硬件、软件和人类元素的设置, 综合和协调, 以便监测, 测试, 轮询, 配置, 分析, 评价和控制网络和网元资源, 用合理的成本满足实时性, 运行能和服务质量的要求;

网络层: 控制平面 5-113

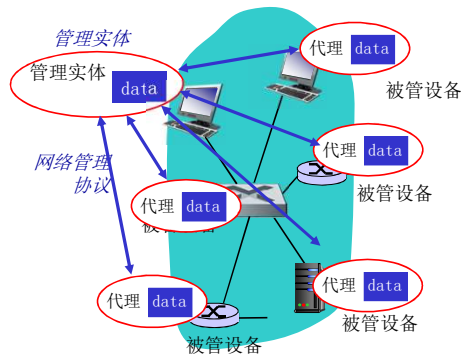
## 网络管理的5大功能

- ❑ 性能管理:
  - 性能(利用率、吞吐量)量化、测量、报告、分析和控制不同网络部件的性能
  - 涉及到的部件: 单独部件(网卡, 协议实体), 端到端的路径
- ❑ 故障管理: 记录、检测和响应故障;
  - 性能管理为长期监测设备性能
  - 故障管理: 突然发生的强度大的性能降低, 强调对故障的响应
- ❑ 配置管理: 跟踪设备的配置, 管理设备配置信息
- ❑ 账户管理: 定义、记录和控制用户和设备访问网络资源
  - 限额使用、给予使用的收费, 以及分配资源访问权限
- ❑ 安全管理: 定义安全策略, 控制对网络资源的使用

网络层: 控制平面 5-114

## 网络管理架构

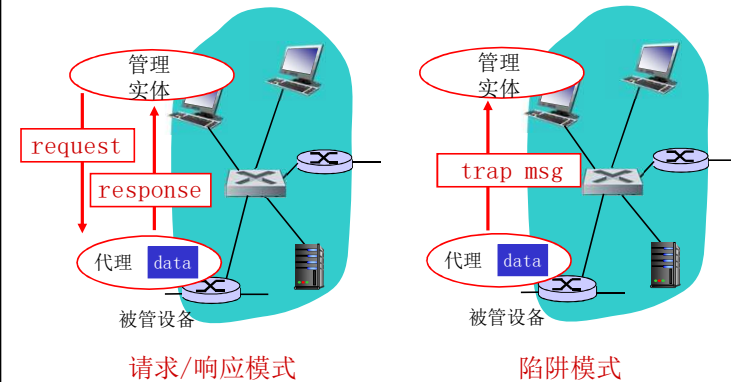
定义:



被管设备  
包含若干  
被管对象  
它们的数据被收集在  
*Management  
Information  
Base (MIB)*

网络层: 控制平面 5-115

## SNMP协议



网络层: 控制平面 5-116

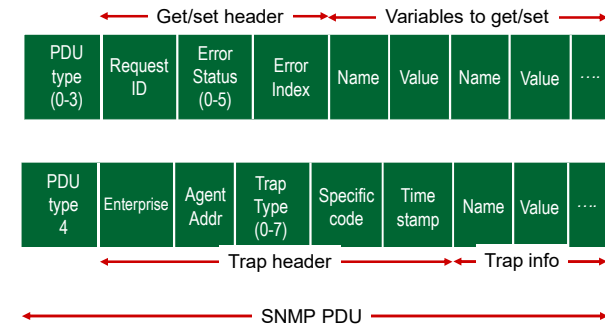


## SNMP 协议：报文类型

报文类型	功能
GetRequest GetNextRequest GetBulkRequest	管理实体-代理：“给我数据” (instance,next in list, block)
InformRequest	实体-实体：给你MIB值
SetRequest	实体-代理：set MIB value
Response	代理-实体：值，对请求的响应
Trap	代理-实体：异常事件的报告

网络层：控制平面 5-117

## SNMP 协议：报文类型



网络层：控制平面 5-118

## 第五章：总结

- ❑ 网络层控制平面的方法
  - 每个路由器控制（传统方法）
  - 逻辑上集中的控制 (software defined networking)
- ❑ 传统路由选择算法
  - 在互联网上的实现：RIP, OSPF, BGP
- ❑ SDN控制器
  - 实际中的实现：ODL, ONOS
- ❑ Internet Control Message Protocol
- ❑ 网络管理和SNMP协议

下一站：链路层

网络层：控制平面 5-119