

第一章：绪论

2025年4月25日 19:59

核心公式



电路交换总时延 = 建立电路时间 + 链路数 × 每条链路时延 (传播时间) + 数据传输时延 + 释放电路时间

报文交换时延 = 链路数 × 链路时延 + 数据传输时延 × 链路数

分组交换时延 = 链路时延 × 链路数 + 分组传输速率 × 分组数 + 分组传输速率 × (链路数 - 1)

默认连续发送

→ 第1个分组总时间 + 后续 (n-1) 个分组的发送时延

发送总时延 传播时延

发送时延 × 链路数

每段链路上传播时延 × 链路数

→ 总发送时延 + 1个分组传播时延

第1个分组总时延

(n-1) 个分组发送时延

性能指标

假设主机 A 和 B 之间的链路带宽为 100Mbps, 主机 A 的网卡速率为 1Gbps, 主机 B 的网卡速率为 10Mbps, 主机 A 给主机 B 发送数据的最高理论速率为 (B)。

A. 1Mbps B. 10Mbps C. 100Mbps D. 1Gbps

节点间通信实际能达到的最高速率, 由带宽、节点性能共同限制。

1-36 主机 A 到主机 B 的路径上有三段链路, 其速率分别为 2Mbit/s, 1Mbit/s 和 500 kbit/s。现在 A 向 B 发送一个大文件。试计算该文件传送的吞吐量。设文件长度为 10 MB, 而网络上没有其他的流量。试问该文件从 A 传送到 B 大约需要多少时间? 为什么这里只是计算大约的时间?

吞吐量由瓶颈链路决定

$T = \frac{10 \text{ MB}}{500 \text{ kbit/s}} = \frac{10 \times 2^{20} \times 8 \text{ bit}}{5 \times 10^5 \text{ bit/s}} = 167.77 \text{ s}$

文件长度 M 是 2 进制方式计算 而非网络带宽中 M 按照 10 进制方式

缺失的细节有, 划分为多大的分组、每个分组首部的开销、在链路上传播时延、在每个节点的处理时延和排队时延等

假定网络的利用率达到了 90%。试估算一下现在的网络时延是它的最小值的多少倍?

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{1-U} = \frac{1}{1-0.9} = 10 \text{ 倍}$$

1-17 收发两端之间的传输距离为 1000km, 信号在媒体上的传播速率为 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。试计算以下两种情况的发送时延和传播时延:

(1) 数据长度为 10^7 bit , 数据发送速率为 100 kbit/s。

(2) 数据长度为 10^6 bit , 数据发送速率为 1 Gbit/s。

从以上计算结果可得出什么结论? 发送与传播哪个占比大是不一定的。

(1) 发送时延 = $\frac{10^7 \text{ bit}}{100 \text{ kbit/s}} = 100 \text{ s}$ 传播时延 = $\frac{1000 \text{ km}}{2 \times 10^8 \text{ m/s}} = 5 \text{ ms}$

(2) 发送时延 = $\frac{10^6 \text{ bit}}{1 \text{ Gbit/s}} = 1 \mu \text{ s}$ 传播时延 = $\frac{1000 \text{ km}}{2 \times 10^8 \text{ m/s}} = 5 \text{ ms}$

1-18 假设信号在媒体上的传播速率为 $2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。媒体长度 1 分别为:

(1) 10 cm (网络接口卡)

(2) 100m (局域网)

(3) 100 km (城域网)

(4) 5000 km (广域网)

现在连续传送数据, 数据率分别为 1Mbit/s 和 10 Gbit/s。试计算每一种情况下在媒体中的比特数 (提示: 媒体中的比特数实际上无法使用仪器测量。本题是假想我们能够看见媒体中正在传播的比特, 能够给媒体中的比特拍个快照。媒体中的比特数取决于媒体的长度和数据率。)

1-19 长度为 100 字节的应用层数据交给运输层传送, 需加上 20 字节的 TCP 首部。再交给网络层传送, 需加上 20 字节的 IP 首部。最后交给数据链路层的以太网传送, 加上首部和尾部共 18 字节。试求数据的传输效率。数据的传输效率是指发送的应用层数据除以所发送的总数据 (即应用数据加上各种首部和尾部的额外开销)。若应用层数据长度为 1000 字节, 数据的传输效率是多少?

传输效率 = $\frac{1000}{18+20+20+1000} = 94.5\%$

8、主机 A 到主机 B 的路径上有三段链路, 其带宽分别为 2Mbps、1Mbps 和 4Mbps。现在 A 向 B 发送一个大文件。试计算该文件传送的吞吐量。设文件长度为 5MB (注意文件长度 M 是 2 进制方式计算, 而非网络带宽中 M 按照 10 进制方式), 而网络上没有其他的流量。试问该文件从 A 传送到 B 大约需要多少时间? 为什么这里只是计算大约的时间, 缺失了哪些细节?

吞吐量 = $\min\{2\text{Mbps}, 1\text{Mbps}, 4\text{Mbps}\} = 1\text{Mbps}$

传输时间 = $\frac{\text{总比特数}}{\text{吞吐量}} = \frac{5\text{MB}}{1\text{Mbps}} = \frac{5 \times 2^{20} \times 8 \text{ bit}}{1 \times 10^6 \text{ bit/s}} = \frac{4194304 \text{ bits}}{1 \times 10^6 \text{ bit/s}} = 41.9434 \approx 41.94 \text{ s}$

仅计算了发送时延, 忽略了传播时延、处理时延、协议开销、分片与重组开销

3、主机 A 向主机 B 之间的传输距离为 1000km, 信号在链路上传播速度为光速的 2/3。试计算以下两种情况下的发送时延和传播时延:

1) 数据长度为 10^6 bit , 信道带宽为 100kbit/s

2) 数据长度为 10^3 bit , 信道带宽为 1Gbit/s

以该题为例, 分析发送时延和传播时延在不同情况下对于总时延的影响。

1) 发送时延 = $\frac{\text{数据长度}}{\text{信道带宽}} = \frac{10^6 \text{ bit}}{100 \text{ kbit/s}} = 10 \text{ s}$

传播时延 = $\frac{\text{传输距离}}{\text{传播速率}} = \frac{1000 \text{ km}}{\frac{2}{3} \times 3 \times 10^8 \text{ km/s}} = 5 \text{ ms}$

总时延 = $10 \text{ s} + 5 \text{ ms} = 10.005 \text{ s}$

2) 发送时延 = $\frac{10^3 \text{ bit}}{1 \text{ Gbit/s}} = 1 \mu \text{ s}$

传播时延 = 5 ms

总时延 = $1 \mu \text{ s} + 5 \text{ ms} = 5.001 \text{ ms}$

第一种情况, 发送时延远大于传播时延, 大部分时间用于发送数据

第二种情况, 发送时延远小于传播时延, 大部分时间用于传播数据

1-20 A、B 主机通过 10Mbit/s 的链路连接到交换机, 每条链路的传播延迟均为 20us, 交换机接受完一个分组为 35us 后转发该分组, 计算 A 向 B 发送一个长度为 10000bit 的分组时, 从 A 开始发送至 B 接收到该分组所需的总时间。(2 分)

答: 总传输时间 = 排队时延 + 发送时延 + 传播时延

= $\frac{10000}{10 \times 10^6} \times 2 + 35 \times 10^{-6} + 20 \times 10^{-6} \times 2 = 2.075 \text{ ms}$

分组交换/报文交换/电路交换

1-10 试在下列条件下比较电路交换和分组交换。要传送的报文共 $x(\text{bit})$ 。从源点到终点共经过 k 段链路, 每段链路的传播时延为 $d(\text{s})$, 数据率为 $b(\text{bit/s})$ 。在电路交换时电路的建立时间为 $s(\text{s})$ 。在分组交换时, 分组长度为 $p(\text{bit})$, 每个分组所必须添加的首部都很短, 对分组的发送时延的影响在本题中可以不考虑。此外, 各节点的排队等待时间也可忽略不计。问在怎样的条件下, 分组交换的时延比电路交换的要小? (提示: 画一下草图观察 k 段链路共有几个节点。)

电路交换 t_c = 建立连接时间 s + 发送报文时间 $\frac{x}{b}$ + 报文传播时间 $k \cdot d$

$t_c = s + \frac{x}{b} + k \cdot d$

分组交换 t_g = 第 1 个分组总时间 (发 k 次, 传 k 段) + 后 $(n-1)$ 个分组发送时间

分组大小 = p 分组数 $n = \frac{x}{p}$

$t_g = \frac{x}{p} \cdot k + k \cdot d + (n-1) \cdot \frac{p}{b} = \frac{x}{p} \cdot k + \frac{x}{b} + \frac{p}{b} \cdot (k-1) + \frac{x}{b} + k \cdot d$

$t_g < t_c \Rightarrow (k-1) \cdot \frac{p}{b} + \frac{x}{b} + k \cdot d < s + \frac{x}{b} + k \cdot d$

$\Rightarrow (k-1) \cdot \frac{p}{b} < s$

1-11 在上题的分组交换网中, 设报文长度和分组长度分别为 x 和 $(p+h)(\text{bit})$, 其中 p 为分组的数据部分的长度, 而 h 为每个分组所添加的首部长度, 与 p 的大小无关。通信的两端共经过 k 段链路。链路的数据率为 $b(\text{bit/s})$, 但传播时延和节点的排队时间均可忽略不计。若打算使总的时延为最小, 问分组的长度 p 应取多大?

分组交换 t_g = 第 1 个分组总时间 + $(n-1)$ 个分组发送时延

$n = \frac{x}{p} \quad T(p) = \frac{x}{p} \cdot k + (n-1) \cdot \frac{p+h}{b} = \frac{x}{p} \cdot k + \frac{x}{b} + \frac{p}{b} \cdot (k-1) + \frac{p}{b} \cdot (k-1)$

$\frac{dT}{dp} = -\frac{x}{p^2} \cdot k + \frac{k-1}{b} = 0 \Rightarrow p = \sqrt{\frac{k-1}{k} \cdot x}$

1-28 假定要在网络上传送 1.5 MB 的文件。设分组长度为 1KB, 往返时间 $\text{RTT} = 80 \text{ ms}$ 。传送数据之前还需要有建立 TCP 连接的时间, 这时间是 $2 \times \text{RTT} = 160 \text{ ms}$ 。试计算在以下几种情况下接收方接收完该文件的最后一个比特所需的时间。

(1) 数据发送速率为 10 Mbit/s, 数据分组可以连续发送。

时延 = 建立连接 + 总发送时延 + 1 个传播时延 = $2\text{RTT} + \frac{1.5 \text{ MB}}{10 \text{ Mbit/s}} + \frac{1.5 \times 2^{20} \times 8 \text{ bit}}{10^7 \text{ bit/s}} + \frac{1}{2} \text{RTT} = 1.458 \text{ s}$

(2) 数据发送速率为 10 Mbit/s, 但每发送完一个分组后要等待一个 RTT 时间才能再发送下一个分组。

分组数 = $\frac{1.5 \text{ MB}}{1 \text{ KB}} = \frac{1.5 \times 2^{20}}{1 \times 2^{10}} = 1.5 \times 2^{10} = 1536$

时延 = 建立连接 + 发送时延 + 等待 (分组数 - 1) + 1 个传播 = $2\text{RTT} + \frac{1.5 \text{ MB}}{10 \text{ Mbit/s}} + \text{RTT} \times (1536 - 1) + \frac{1}{2} \text{RTT} = 124.758 \text{ s}$

(3) 数据发送速率极快, 可以不考虑发送数据所需的时间。但规定在每一个 RTT 往返时间内只能发送 20 个分组。

发送次数 = $\lceil \frac{1536}{20} \rceil = 76$

时延 = 建立连接 + 前 75 个分组发送等待 + 最后 1 个分组传播时延 = $2\text{RTT} + 76 \times \text{RTT} + \frac{1}{2} \text{RTT} = 6.28 \text{ s}$

(4) 数据发送速率极快, 可以不考虑发送数据所需的时间。但在第一个 RTT 往返时间内只能发送一个分组, 在第二个 RTT 内可发送四个分组, 在第三个 RTT 内可发送四个分组 (即 $2^3 - 1 = 2^2 - 4$ 个分组) (这种发送方式见教材第 5 章 TCP 的拥塞控制部分)。

$N = 1536$ 过 n 个 RTT 总共发送了 $1 + 2 + 2^2 + \dots + 2^{n-1} = 2^n - 1$ 个分组

$2^n - 1 = 1023$, 第 11 次发送剩下的 $513 < 2^{10} - 1 = 1024$

时延 = $2\text{RTT} + 10\text{RTT} + \frac{1}{2} \text{RTT} = 15$

1-29 有一个点对点链路, 长度为 50km。若数据在此链路上传播速率为 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$, 试问链路的带宽应为多少才能使传播时延和发送 100 字节的分组的发送时延一样大? 如果发送的是 512 字节长的分组, 结果又应如何?

传播时延 = $\frac{50 \text{ km}}{2 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}$

100 字节: 发送时延 = $\frac{100 \times 8 \text{ bit}}{v} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ s} \Rightarrow v = 3.2 \text{ Mbit/s}$

512 字节: 发送时延 = $\frac{512 \times 8 \text{ bit}}{v'} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ s} \Rightarrow v' = 16.384 \text{ Mbit/s}$

1-34 主机 A 向主机 B 发送一个长度为 107 比特的报文, 中间要经过两个节点交换机, 即一共经过三段链路。设每条链路的传输速率为 2 Mbit/s, 忽略所有的传播、处理和排队时延。

(1) 如果采用报文交换, 即整个报文不分段, 每台节点交换机收到整个的报文后再转发。问从主机 A 把报文传送到第一个节点交换机需要多少时间? 从主机 A 把报文传送到主机 B 需要多少时间?

发送时延 = $\frac{107 \text{ bit}}{2 \text{ Mbit/s}} = 5 \text{ s}$

传到第一个节点交换机: 5s

传到 B 主机: 15s

(2) 如果采用分组交换, 报文被划分为 1000 个等长的分组 (这里忽略分组首部对本题计算的影响), 并连续发送。节点交换机能够直接接收边发送。问从主机 A 把第一个分组传送到第一个节点交换机需要多少时间? 从主机 A 把第一个分组传送到主机 B 需要多少时间? 从主机 A 把 1000 个分组传送到主机 B 需要多少时间?

1 个分组大小 = $\frac{107}{1000} = 10.7$

第 1 个分组传到第 1 节点 = 1 个发送时延 = $\frac{10.7 \text{ bit}}{2 \text{ Mbit/s}} = 5 \text{ ms}$

第 1 个分组传到 B = $3 \times 5 \text{ ms} = 15 \text{ ms}$

传 1000 个分组到 B = 1 个分组总时延 + 其它分组发送时延 = $15 \text{ ms} + 999 \times 5 \text{ ms} = 5.01 \text{ s}$

1-35 主机 A 向主机 B 连续传送一个 600000 bit 的文件。A 和 B 之间有一条带宽为 1 Mbit/s 的链路相连, 距离为 5000km, 在此链路上的传播速率为 $2.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(1) 数据上的比特数目的最大值是多少?

(2) 链路上每比特的宽度 (以米来计算) 是多少?

(3) 若想把链路上每比特的宽度变为 5000 km (即整条链路的长度), 这时应把发送速率调整到什么数值?

(1) 比特数 = 传播时延 × 带宽 = $\frac{5 \times 10^6 \text{ m}}{2.5 \times 10^8 \text{ m/s}} \times 10^6 \text{ bit/s} = 2 \times 10^4 \text{ bit}$

(2) 宽度 $\alpha = \frac{\text{链路长度}}{\text{比特数}} = \frac{5 \times 10^6 \text{ m}}{2 \times 10^4 \text{ bit}} = 250 \text{ m/bit}$

(3) $\alpha = \frac{\text{链路长度}}{\text{比特数}} = \frac{\text{传播速率}}{\text{带宽}} = \frac{2.5 \times 10^8 \text{ m/s}}{5 \times 10^6 \text{ m}} = 5 \times 10^2 \text{ m/s}$

$\Rightarrow \text{带宽} = \frac{2.5 \times 10^8 \text{ m/s}}{5 \times 10^2 \text{ m}} = 500 \text{ bit/s}$

2、主机 A 向主机 B 发送一个长度为 1000 字节的报文, 中间要经过三个节点交换机, 即共经过 4 段链路, 每段链路长 1 公里, 带宽均为 1Mbps。请计算分别在下列情况下, 数据传输需要的总时间。(已知信号在链路上的传播速度为光速的 2/3)。

1) 采用电路交换, 建立电路和释放电路的时间均为 10 微秒;

2) 采用报文交换, 每个报文为 20 字节;

3) 采用分组交换, 每个分组的长度为 120 字节 (其中, 分组头长度为 20 字节)

4) 以该题为例, 比较用整个报文传送和划分成多个分组传送的优缺点

电路交换: 建立连接: 10ms

释放电路: 10ms

传输时间 = $\frac{\text{报文大小}}{\text{带宽}} = \frac{1000 \text{ B}}{1 \text{ Mbps}} = \frac{8000 \text{ bit}}{10^6 \text{ bit/s}} = 8 \text{ ms}$

传播时间 = $\frac{\text{链路长度}}{\text{传播速率}} = \frac{4 \text{ km}}{\frac{2}{3} \times 3 \times 10^8 \text{ km/s}} = 20 \mu \text{ s}$

总时间 = $10 \mu \text{ s} + 10 \mu \text{ s} + 8 \text{ ms} + 20 \mu \text{ s} = 8.04 \text{ ms}$

报文交换: 传输时间 = $\frac{\text{报文长度}}{\text{带宽}} = \frac{1000 \text{ B} + 20 \text{ B}}{1 \text{ Mbps}} = 8.16 \text{ ms}$

传播时间 = $\frac{\text{链路长度}}{\text{传播速率}} = \frac{4 \text{ km}}{\frac{2}{3} \times 3 \times 10^8 \text{ km/s}} = 20 \mu \text{ s}$

总时间 = 传输时间 × 链路数 + 传播时间 = $8.16 \text{ ms} \times 4 + 20 \mu \text{ s} = 32.66 \text{ ms}$

分组交换: 分组数量 = $\frac{\text{报文长度}}{\text{分组长度}} = \frac{1000 \text{ B}}{120 \text{ B} - 20 \text{ B}} = 10$

分组发送时间 = $\frac{\text{分组长度}}{\text{带宽}} = \frac{120 \text{ B}}{1 \text{ Mbps}} = 0.96 \text{ ms}$

传播时间 = $\frac{\text{链路长度}}{\text{传播速率}} = \frac{4 \text{ km}}{\frac{2}{3} \times 3 \times 10^8 \text{ km/s}} = 20 \mu \text{ s}$

总时间 = 分组发送时间 × (分组数量 + 链路数 - 1) + 传播时间

= $0.96 \text{ ms} \times (10 + 4 - 1) + 20 \mu \text{ s} = 12.5 \text{ ms}$

5、一个 5 层分层体系结构的网络中, 已知应用层、传输层、网络层的头部分别为 32 字节、20 字节和 20 字节, 数据链路层的帧头和帧尾分别 14 字节和 4 字节; 网络层不能传输载荷长度超过 1500 字节的数据包。网络中的某主机的应用程序发送一个 2900 字节的请求消息 (不含应用层首部) 到带宽为 1Mbps 的线路上, 假设传输不出错, 试求数据的传输效率、该消息完整的发送时延以及有效利用的带宽。数据的传输效率是指发送的应用层数据除以所发送的总数据 (即应用数据加上各种首部和尾部的额外开销)。

总发送数据 = $1518 \text{ B} + 1510 \text{ B} = 3028 \text{ B}$

数据传输效率 = $\frac{2900 \text{ B}}{3028 \text{ B}} = 95.77\%$

发送时延 = $\frac{3028 \text{ B}}{1 \text{ Mbps}} = \frac{24224 \times 8 \text{ bit}}{1 \times 10^6 \text{ bit/s}} = 0.24224 \text{ s} = 24.224 \text{ ms}$

有效带宽 = $\frac{2900 \text{ B}}{0.24224 \text{ s}} = \frac{2900 \times 8 \text{ bit}}{0.24224 \text{ s}} = 95728 \text{ bps} \approx 0.958 \text{ Mbps}$