第六章 传输层协议

课前思考

- 传输层的任务是什么？
- 传输层协议主要涉及哪些内容？
- 为什么说传输层协议是真正的端到端协议？
- 为什么传输连接需要三次握手？
- TCP与UDP区别是什么？
- 传输地址与网络地址有什么不同？
- 出错或丢失的IP分组会重发吗？

本章内容

6.1 传输层概述

6.2 传输服务质量

6.3 传输层协议机制

6.4 TCP协议

6.5 UDP协议

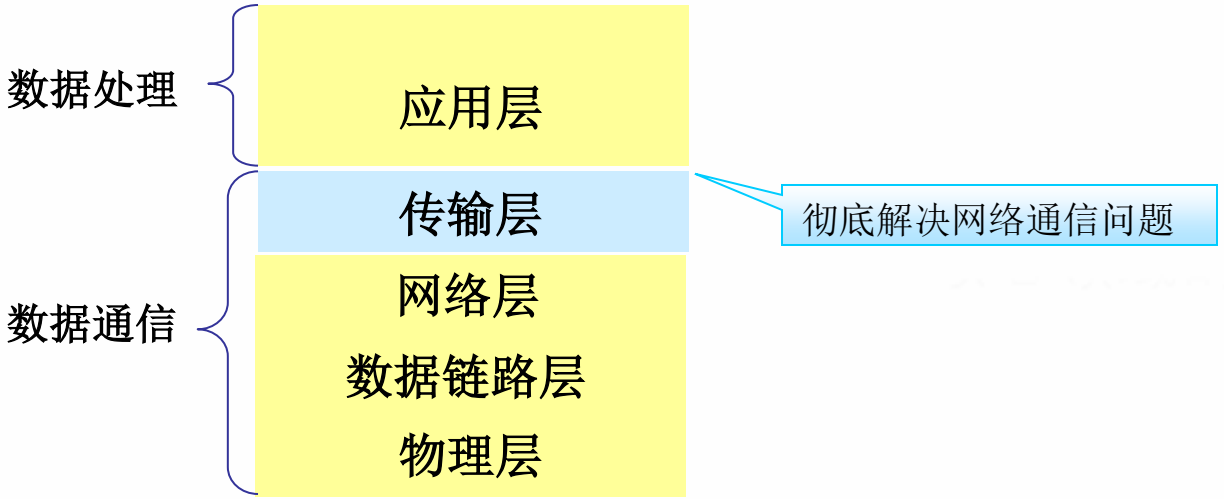
6.1 传输层概述

- 传输层功能

  完成主机进程－主机进程之间的报文传输。

- 传输层地位

  位于网络体系结构的中间，作为数据通信和数据处理的分水岭，具有承上启下的作用。



6.1 传输层概述

- 传输层要彻底解决网络通信问题，使得应用层不必关心通信问题。
- 传输层是真正的端对端的通信。
  - 传输层协议在端主机上运行，路由器一般没有传输层。
  - 传输层从主机层面上对网络层采取相应补救措施，可以提供更高质量的数据传输能力。
  - 传输层独立于网络设备，可以提供标准的传输服务接口（原语）。
- 传输层协议涉及的内容
  - **寻址：**传输地址及其发现。
  - **差错控制：**分组顺序、差错检测、重传确认机制等。
  - **连接管理：**连接建立、连接释放。
  - **流量控制：**主机进程之间的流量控制。

6.2 传输服务质量（QoS）

- 传输服务质量反映网络最终通信质量
- 传输服务质量参数
  - 连接建立延迟

    发出连接请求到连接建立成功之间的时间。
  - 连接建立失败概率
  - 吞吐量

    在一条传输连接上，每秒传输有效数据的字节数。
  - 传输延迟

    从开始传输数据到该数据被收到为止的 时间。

    传输延迟=传播时间+排队时间+服务时间
  - 残留差错率

    传输连接上数据出错的概率。

6.2 传输服务质量（QoS）

- **保护性**

  传输过程中保障数据安全的能力，包括防止非法窃取、篡改数据等。

- **优先权**

  保证高优先权的传输连接优先传输数据、优先获得网络资源的能力。

- **回弹率**

  由于某种原因而自发终止传输连接的概率。

6.3 传输层协议机制

6.3.1 传输协议数据单元

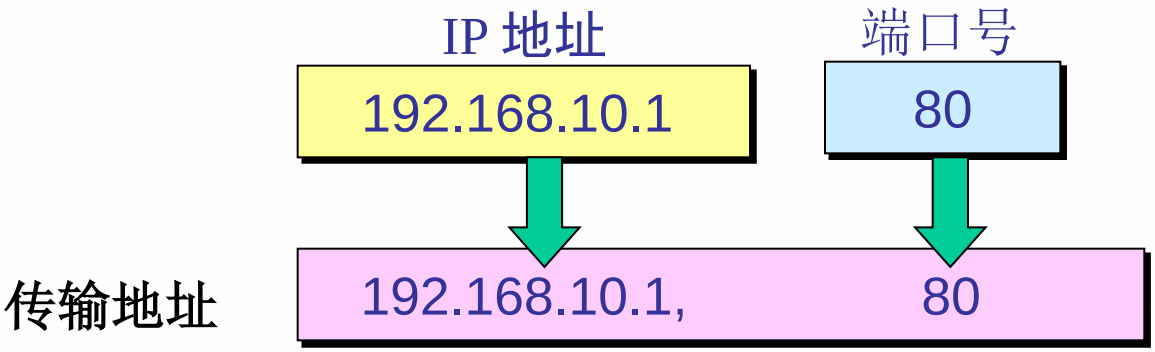
- 传输协议数据单元（ TPDU）是传输层的最小数据传输单位，又称为“报文段”。

- TPDU类型
  - CR：连接请求
  - CC：连接确认，对CR TPDU的确认
  - DR：断连请求
  - DC：断连确认，对DR TPDU的确认
  - DT：数据（高层数据）
  - AK：数据确认，对DT TPDU的确认
  - REJ：拒绝接受请求，或拒绝接受DT TPDU

6.3 传输层协议机制

6.3.2 传输地址

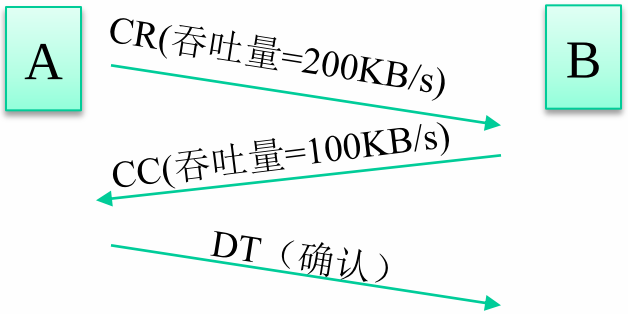
- 传输地址唯一地标识主机进程
- 传输地址=网络号+主机号+端口号，端口号即传输服务访问点（TSAP)，用来标识应用进程。
- 在IP网络，传输地址= IP地址+端口号



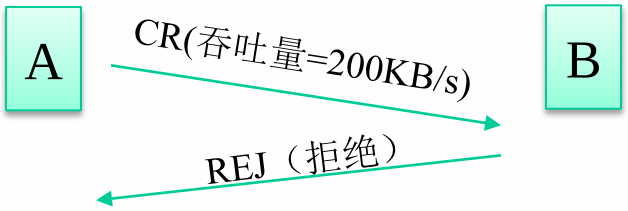
6.3 传输层协议机制

6.3.3 传输连接

- 传输连接实质上是通过传输地址,建立两个主机进程之间的连接 。
- 其他层上的连接一般采用“两次握手”，建立传输连接过程比较复杂，双方需进行反复协商，通常采用“三次握手”，其原因是：
  - 传输服务质量等参数进行多次协商，有助于提高连接成功率。



三次握手连接成功



二次握手连接失败

  - 网络层服务不可靠（如IP协议)，“两次握手”可能导致连接失败。

P.267：图6.10，图6.11

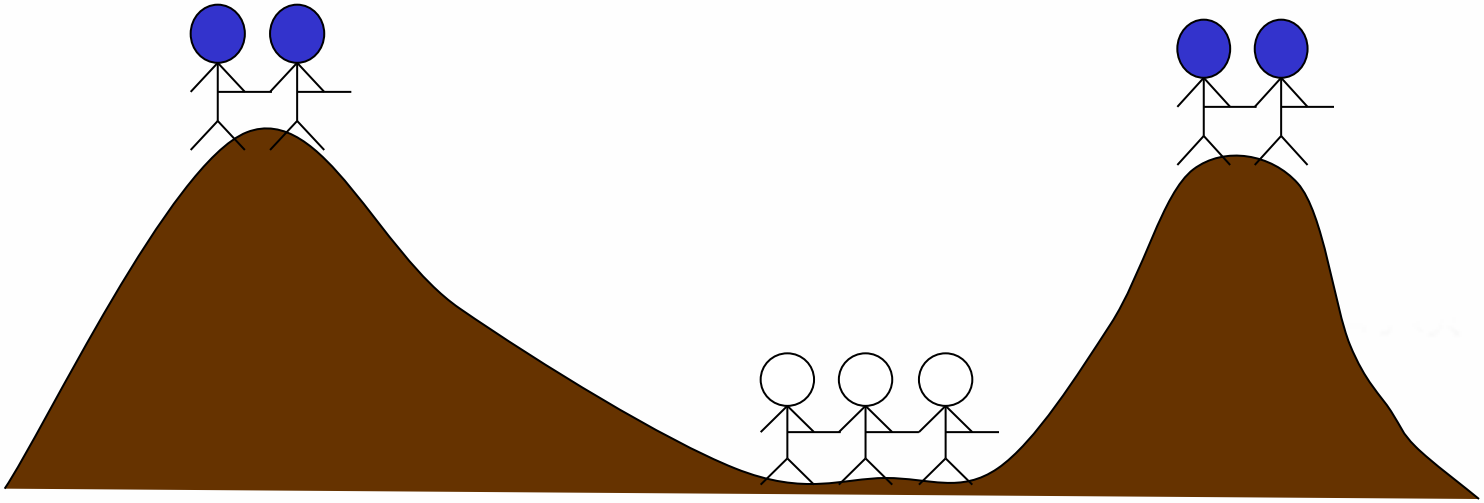
6.3 传输层协议机制

- 建立传输连接过程
  - 发起方发出建立连接请求CR TPDU，提出相关服务质量要求及其它参数与对方协商，包括：
    - 吞吐量
    - TPDU的大小等
    - 传输层是否进行流量和差错控制
    - 是否允许加密数据
    - 最长等待时间（确认时间）
    - ……
  - 接收方收到连接请求CR TPDU后，
    - 若同意（或适当修改协商参数），返回连接确认CC TPDU 。
    - 若不同意，则返回断连请求DR TPDU，并附带原因参数。
  - 发送方收到连接确认CC TPDU后，
    - 发送第一个数据TPDU（ DT TPDU）确认连接建立；
    - 发送REJ TPDU拒绝连接。

6.3 传输层协议机制

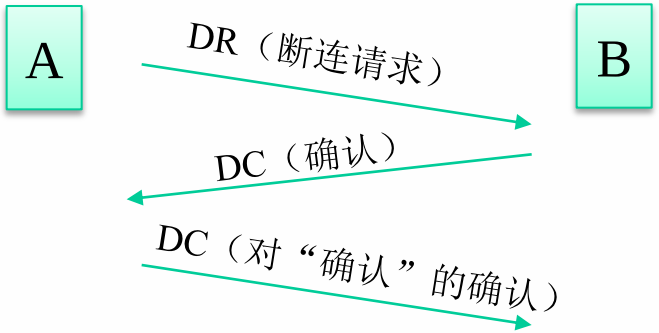
- 释放传输连接
  - 白军/蓝军问题

占据两个山顶的蓝军包围了山谷中的白军。两个山顶上的蓝军同时出击，则白军必败；若一个山顶的蓝军单独出击，则蓝军必败。所以，两个山顶上的蓝军若要取胜，则必须派出通讯员，穿过山谷（可能被白军俘虏），约定同时出击。**你能设计出这种通信协议吗？**



6.3 传输层协议机制

- 释放连接仍采用“三次握手”



三次握手释放连接

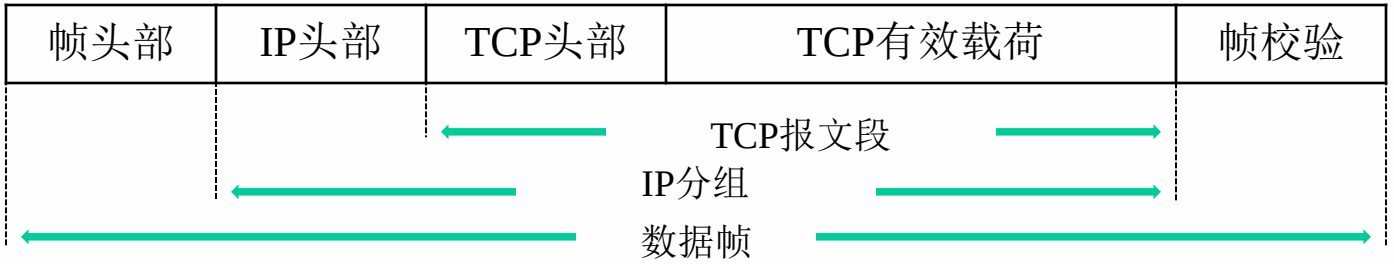
6.4 TCP协议

6.4.1 TCP概述

- Internet的两个传输层协议
  - TCP（Transmission Control Protocol）：在IP支持下，为应用层提供面向连接的、可靠的端到端字节流服务。
  - UDP（User Datagram Protocol）：为应用层提供非面向连接的、不可靠的传输服务。
- TCP传输地址（套接字）：IP地址+端口号
  - TCP连接用四元组<源IP地址，源端口号，目的IP地址，目的端口号>表示。
  - 端口号16位，端口号范围：0 － 65535 ；其中0–1023称为著名端口号，分配标准服务使用，如FTP服务器端口号为21，HTTP服务器端口号80，TELNET服务器端口号为23，SMTP服务器端口号为25。

6.4 TCP协议

- TCP最初在Unix环境下实现，后来也在Windows环境下实现，通过Socket提供服务，见P.261。
- 报文段（即TPDU)封装在IP分组中， IP分组封装在数据帧中。



- TCP提供全双工数据传输服务，如果主机进程A和主机进程B建立了一条传输连接，则意味着A，B都可以同时发送和接收TCP报文段。
- TCP不支持组播和广播。
- TCP连接提供可靠的字节流服务

如果发送了4个有效载荷为512B的报文段，接收方收到后，向应用层提供2048B的字节流，而不是4个报文段。这是因为TCP是真正的端到端通信，接收端无需再转发。

6.4 TCP协议

6.4.2 TCP报文段格式

TCP报文段是TCP协议的数据交换单元，其格式如下：

6.4 TCP协议

- **源/目的端口号：** 各占16位，表示发送方和接收方的端口号。
- **顺序号：** 32位，表示TCP段中的数据部分第1个字节的编号。
- **确认号：** 32位，表示期望接收数据的第1个字节的编号，同时表示对确认号之前数据的确认。
- **数据偏移：** 4位，表示TCP段头长度，包括固定和可变部分，单位为字（32位）
- URG：紧急数据标志。当有紧急数据时，该标志为“1”。
- ACK：该标志若为“1”，则表示**确认号**有效；若为“0”，则**确认号**无效。
- PSH：表示要求马上发送数据，不必等到缓冲区满时才发送。
  例如，TELNET协议中，每输入一个字符就必须立即发送。
- RST：该标志用于对本次TCP连接进行复位。通常在TCP连接发生故障时设置本位，以便双方重新同步，并初始化某些连接变量。如接收方收到它不希望接收的报文段，则将RST置“1“。

6.4 TCP协议

- SYN：用于建立TCP连接。
  - SYN置为“1”且ACK置为“0”，表示请求建立TCP连接
  - SYN置为“1”且ACK置为“1”，表示确认TCP连接。
- FIN：用于释放连接。若FIN置为“1”，则表示没有数据要发送了，但仍可以接收数据。
- **窗口大小：** 16位，用于TCP流量控制。表示从确认的字节号开始还可以接收多少字节。窗口大小也允许为“0”，表示确认号以前的字节已收到，但暂停接收数据。
- **校验和：** 16位，用于对TCP报文段进行校验（类似于IP校验和），但校验范围包括头部和数据部分。计算校验和需包括一个TCP伪头，这样有助于检测分组是否被错误递交。

TCP伪头

6.4 TCP协议

- **紧急指针：** 当URG为“1”时，紧急指针给出TCP段中紧急数据的长度，单位为字节；数据字段的起始位置（**顺序号**）作为紧急数据的开始位置。

- **选项：** 目前TCP只规定一种选项，即最大的TCP段长（MSS），缺省值是556B。TCP实体双方可通过协商确定一个特定的最大TCP段长。

  若MSS选的太小，则由于帧头和报头开销而网络利用率会降低；若MSS选的太大，则由于IP层分段而增加额外开销。一般认为， MSS应尽可能选大些，只要IP层不需要分段就行。

- **填充：** 以0为填充位，确保TCP头部以32位边界结束。

- **数据：** TCP载荷数据，由于IP分组长度限制，TCP最大载荷长度=65535B−20B-20B=65495B。

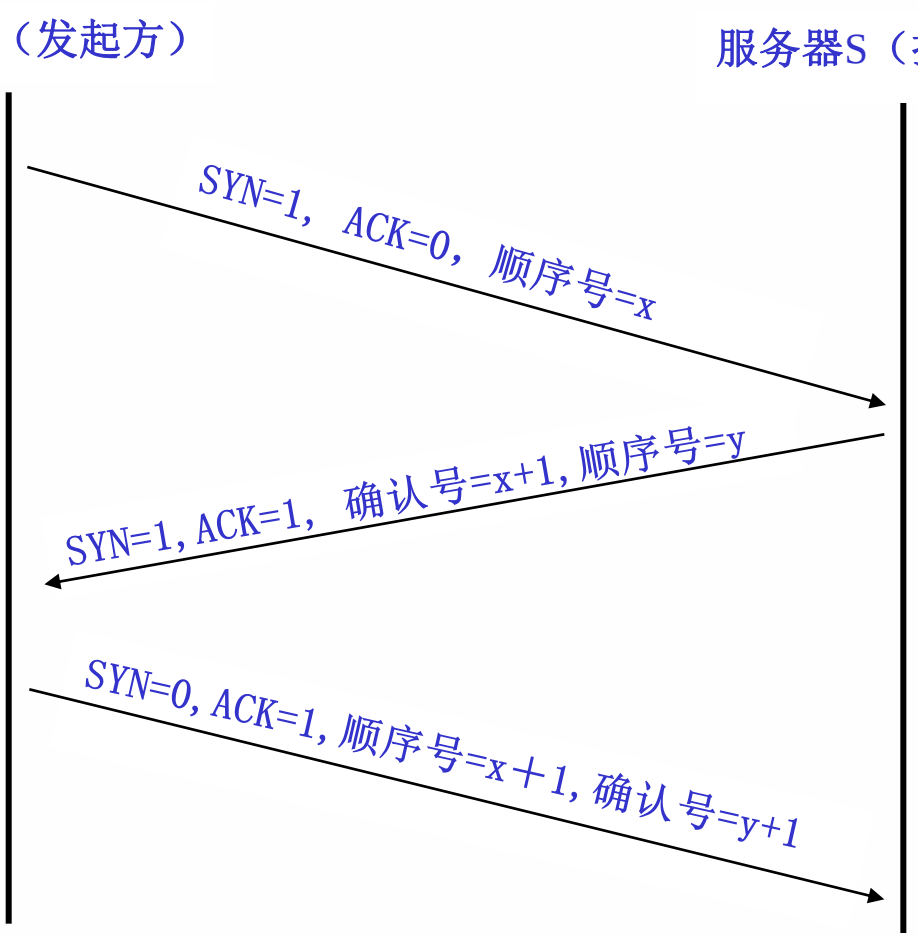
6.4.3 TCP连接管理

- 建立TCP连接的目的
  - 发现对方是否存在
  - 进行参数协商（协议类、MSS、窗口大小、服务质量等）
  - 为TCP实体分配资源（缓冲区、连接表等）
- TCP连接建立
  - 采用C/S方式
    - 建立TCP连接，首先要解决的问题是如何获得对方的端口号。

      发起方C（客户机）首先发起连接请求。选择一个≥1024的端口作为源端口，使用接收方S（服务器）著名的端口号（＜1024)作为目的端口，如FTP使用21号端口，Telnet使用23号端口，SMTP使用25号端口，HTTP使用80号端口等。
    - 接收方S（服务器）始终监听特定的端口，等待发起方C（客户端）的连接请求； 当收到连接请求后，就知道了发起方C的端口号。

6.4 TCP协议

- 采用“三次握手”



6.4 TCP协议

- 客户端发出连接请求TCP段（SYN＝1，ACK＝0，顺序号=x，其中x为随机整数），指明想要连接的服务器端口号（目的端口），设置TCP段的最大段长及其它参数。

- 服务器的TCP实体收到该请求后，检查是否有进程在监听目的端口；
  - 如果没有，则返回拒绝TCP段（RST＝1）的作为应答，拒绝请求。
  - 如果有，则该进程可以接受或拒绝连接请求：

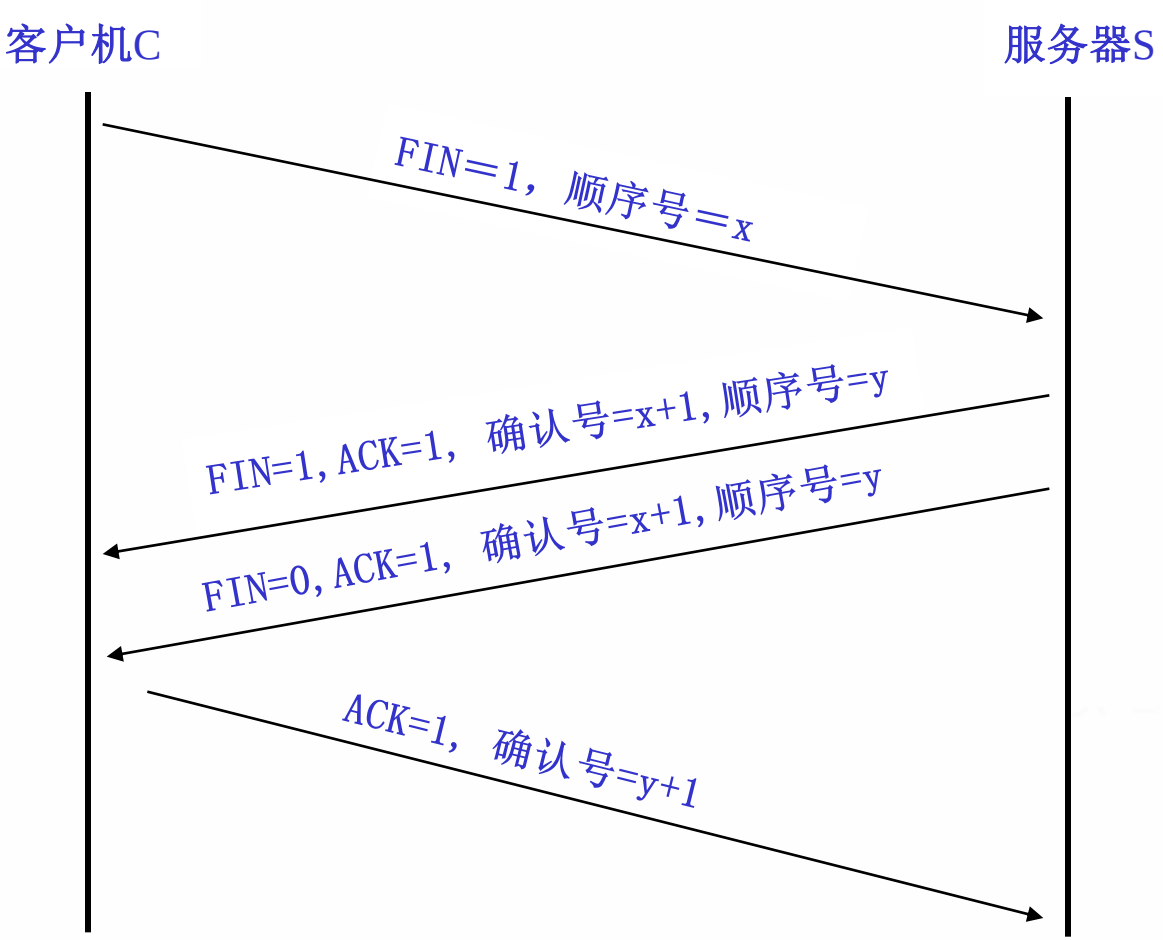
    如果接受，则返回确认TCP段（SYN＝1，ACK＝1，顺序号=y，确认号=x+1,其中y为随机整数）。

    如果拒绝则返回拒绝TCP段（RST＝1）。

- 客户端收到确认TCP段后，也发送一个确认TCP段（SYN＝0，ACK＝1），并允许该TCP段直接开始发送数据。

6.4 TCP协议

- **TCP连接释放：**仍采用“三次握手”



6.4 TCP协议

- **主机A发送断连请求TCP段（FIN＝1 ），向主机B表明“我已无数据要发送，但如果你要发送数据，我仍能接收”。**
- **主机B收到断连请求后，**

  如果无数据传输，则返回应答TCP段（ FIN＝1，ACK＝1 ）；

  如果有数据传输，则返回应答TCP段（ FIN＝0，ACK＝1 ）；
- 主机A返回确认TCP段（ACK＝1）。

6.4.4 TCP流量管理

- **为什么要进行流量控制**

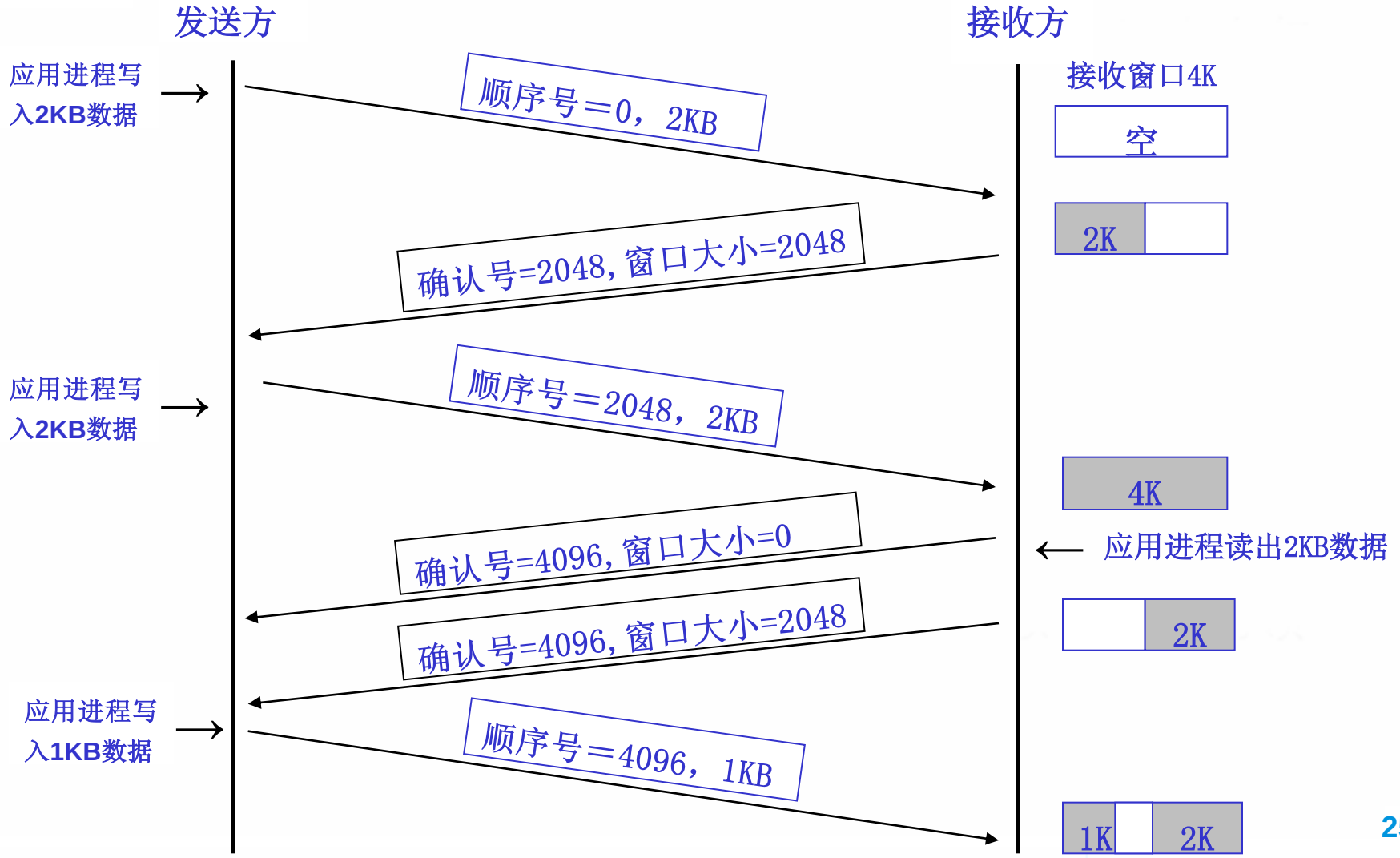
  发送方TCP实体发送数据过快，接收方TCP实体来不及处理，导致接收缓冲区溢出。

- **TCP流量控制采用可变尺寸的滑动窗口协议。**
  - 由于TCP为应用层提供字节流服务，窗口尺寸以字节为单位。
  - 应用进程根据处理能力读取TCP接收缓冲区中的字节流，导致空闲的接收缓冲区（**接收窗口**）动态变化。

- **TCP流量控制过程**

  类似于数据链路层的滑动窗口协议，所不同的是：通过接收窗口当前尺寸调整发送窗口的上限值。

6.4 TCP协议


发送方
接收方
应用进程写入2KB数据
顺序号＝0，2KB
接收窗口4K
空
2K
确认号=2048，窗口大小=2048
应用进程写入2KB数据
顺序号＝2048，2KB
4K
确认号=4096，窗口大小=0
应用进程读出2KB数据
确认号=4096，窗口大小=2048
2K
应用进程写入1KB数据
顺序号＝4096，1KB
1K
2K

6.4.5 TCP拥塞控制

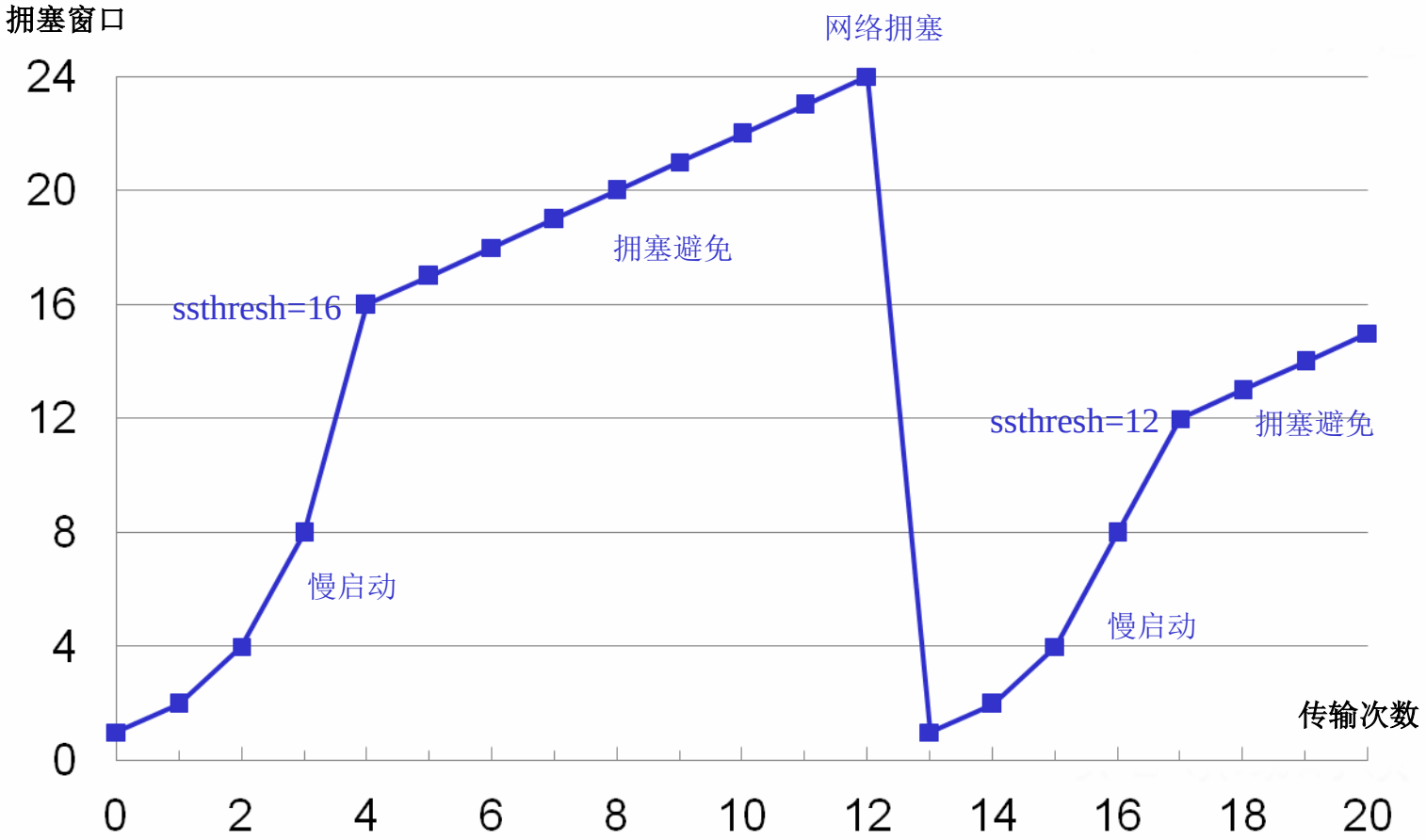
- **TCP拥塞控制与流量控制的区别**
- 拥塞控制是为了防止网络过载导致路由器缓冲区不足而造成IP分组的丢失。
- 流量控制是为了防止发送端发送速度过快，导致接收端缓冲区不足而造成TCP段的丢失。
- **从理论上讲，网络过载（即网络拥塞）问题应由网络层（IP）解决，但IP没有实现拥塞控制功能，Internet拥塞控制实际上由TCP完成。**
- **TCP拥塞控制策略**
  - 发送端设置**拥塞窗口**来反映网络容量，通过**拥塞窗口**来限制发送方向网络注入数据的速度，即发送端允许发送的数据既不能超过**接收窗口的大小**，也不能超过**拥塞窗口的大小**；前者是为了流量控制，后者是为了拥塞控制。
  - 通过**慢启动**和**拥塞避免策略**来控制拥塞窗口的大小。

6.4 TCP协议

- TCP拥塞控制过程
  - 慢启动
    - 设：ssthresh为慢启动阈值，MSS为最大TCP段长度，cwnd为拥塞窗口大小。
    - 发送端初始cwnd一般设置为1个MSS，ssthresh设置为接收窗口大小。
    - 每收到一个确认ACK，则cwnd = cwnd + 1个MSS。

      初始cwnd=1，发送端发送1个报文段M_0，接收端收到后返回ACK_1。发送端收到ACK_1后，将cwnd从1增大到2，于是接着发送M_1和M_2两个报文段。接收端收到后返回ACK_2和ACK_3。发送端收到后，将cwnd从2增大到4，于是接着发送M_3～M_6共4个报文段。……
    - 当cwnd ＞ssthresh时，进入**拥塞避免**阶段。
  - 拥塞避免
    - 每经过一个往返传输时间RTT（不管在RTT 时间内收到几个ACK ），则cwnd = cwnd +1个MSS；RTT是动态变化的。
    - 如果超过一段时间（TCP重传超时）没有收到TCP报文段，则认为**网络拥塞**。
    - 不管是慢启动阶段，还是拥塞避免阶段，如果TCP检测到拥塞，则将ssthresh缩减成cwnd的一半，且cwnd恢复为初始大小，即1个MSS。

6.4 TCP协议



- ssthresh初始值(16)为接收窗口大小。
- 慢启动不是指cwnd增长速度慢，而是指初始设置cwnd=1。

6.5 UDP协议

- UDP是非面向连接，不可靠的传输协议。
  - 不需要建立连接。
  - 不支持流量控制和拥塞控制，没有确认/重传机制。
  - UDP段在传输过程中可能会丢失、失序和延迟。
  - 支持广播和组播，这对多媒体传输是非常有用的。
- UDP实质上在IP基础上，增加了端口机制，实现了主机进程间的数据传输。
- UDP报文段格式

0	8	16	31
源端口号		目的端口号	
长度		校验和	
用户数据			

6.5 UDP协议

- UDP计算“校验和”方法同TCP，也需要包括一个UDP伪头；一旦发现出错，则简单地丢弃，“重传”由应用层完成。

UDP伪头

- UDP采用尽力而为方式，不能保证传输的可靠性，既没有重传机制，也没有流量控制和拥塞控制，主机不需要维护具有许多参数、复杂的连接状态表，因此减少了开销和发送数据之前的延时，适合很多实时应用，如IP电话、视频传输等。

本章小结

- 内容

  主要介绍传输层协议及其相关技术，包括传输服务质量（QoS）、传输地址、传输连接的建立和拆除、流量控制、拥塞控制 、Internet的主要传输层协议实例TCP、UDP等。

- 重点

  TCP协议原理， TCP报文段格式及每个字段的含义，传输连接的建立和拆除过程。