拥塞控制

1. 输出链路速率R：路由器出接口物理输入速率
2. 发送速率 λ_in：主机向该链路发送数据的平均速率
3. 吞吐量 λ-out：连接实际成功到达目的地的数据接收的速率
4. 输入负载：网络被"请求传输"的数据率
5. 排队及延迟/丢包：当输入速率超过链路处理能力时，排队、延迟

当输入负载超过链路承载能力或接近时，就会出现拥塞现象。

1. 发送速率高 → 排队增长
2. 排队超出缓冲 → 丢包

⇒ 丢包触发重传 → 再次发送 → 重传造成更多输入负载（恶性循环）

必须在发送端实现拥塞控制：动态调节发送速率，避免把网络推到临界值

TCP拥塞控制

防止网络因为数据过多而崩溃（丢包、延迟暴涨、吞吐下降）。

TCP通过动态调节发送来实现。

cwnd

拥塞窗口：TCP自己维护的"允许发送但未确认的数据量"上限，用于控制发送速率。

rwnd

接收窗口：接收方告诉发送方还能接收多少数据，防止接收方溢出）。

发送窗口 = min(rwnd, cwnd) 共同决定发送速率。

ssthresh 慢启动阈值。

四个机制：

1. 慢启动：

快速探测网络可用带宽。

初始cwnd很小，每收到一个ACK，cwnd+1。（指数增长）

当cwnd ≥ ssthresh（慢启动阈值）时，进入下一阶段。

2. 拥塞避免

在接近网络饱和时避免拥塞.

cwnd线性增加2(每RTT增加2*1MSS)

如果发生丢包↓，说明网络拥塞→启动恢复机制.

3. 快速重传

检测机制：如果收到三个重复的ACK，说明某报文段可能丢失.

立即重传丢失的包(不等超时)，提高恢复速度.

4. 快速恢复

在检测到丢包时，不必把cwnd降得太低

将ssthresh设为cwnd的一半

cwnd也降一半，进入拥塞避免阶段.

TCP拥塞控制：自适应速度调节机制.通过四个阶段让连接能快速利用带宽，又能在发现拥塞时及时退让，保证高效又稳定.