传输层

@M了个J
李明杰

https://github.com/CoderMJLee

https://space.bilibili.com/325538782

小码哥教育 SEEMYGO

实力IT教育 www.520it.com

传输层（Transport）

- 传输层有2个协议
  - TCP（Transmission Control Protocol），传输控制协议
  - UDP（User Datagram Protocol），用户数据报协议

	TCP	UDP
连接性	面向连接	无连接
可靠性	可靠传输，不丢包	不可靠传输，尽最大努力交付，可能丢包
首部占用空间	大	小
传输速率	慢	快
资源消耗	大	小
应用场景	浏览器、文件传输、邮件发送	音视频通话、直播
应用层协议	HTTP、HTTPS、FTP、SMTP、DNS	DNS

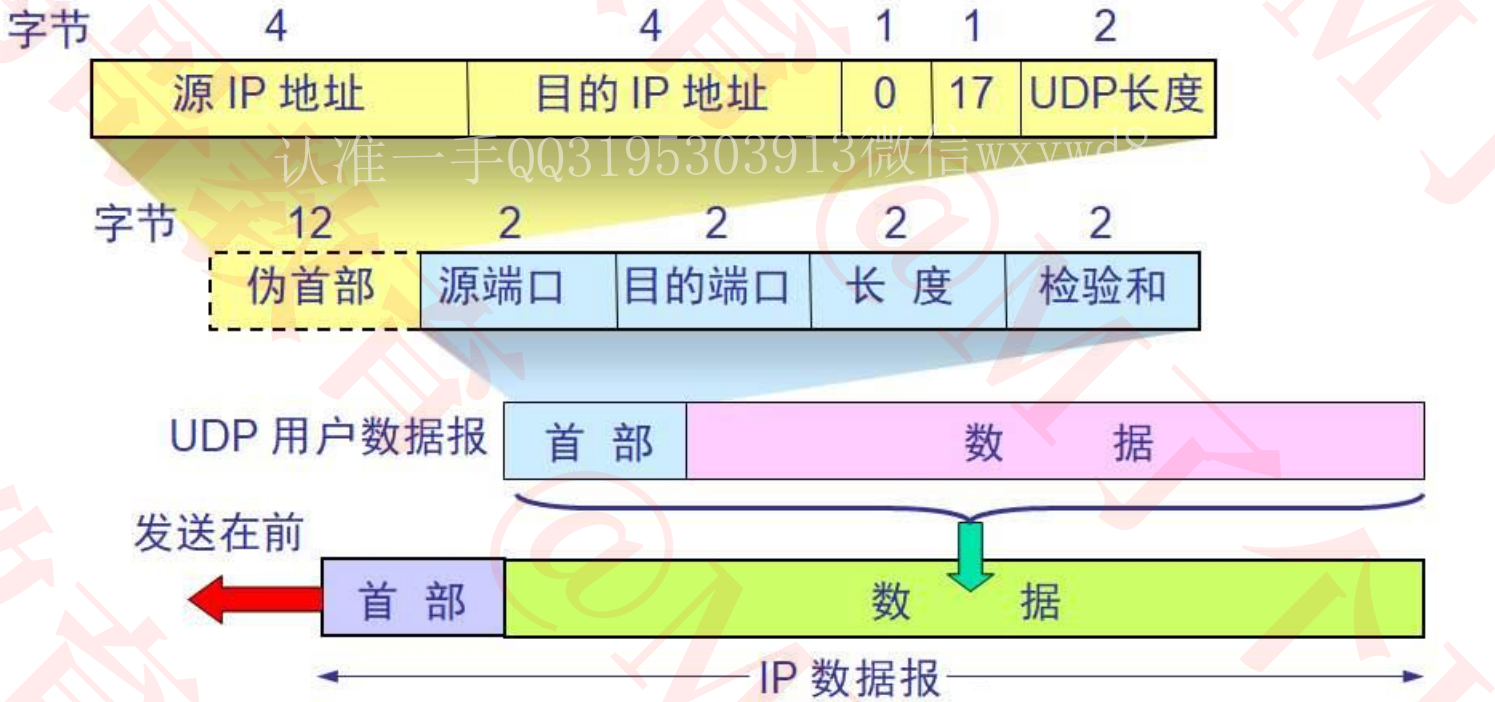
UDP – 数据格式

- UDP是无连接的，减少了建立和释放连接的开销
- UDP尽最大能力交付，不保证可靠交付
  - 因此不需要维护一些复杂的参数，首部只有8个字节（TCP的首部至少20个字节）

- UDP长度（Length）
  - 占16位，首部的长度 + 数据的长度

UDP – 检验和（Checksum）

- 检验和的计算内容：伪首部 + 首部 + 数据
- 伪首部：仅在计算检验和时起作用，并不会传递给网络层



端口（Port）

- UDP首部中端口是占用2字节
  - 可以推测出端口号的取值范围是：0~65535

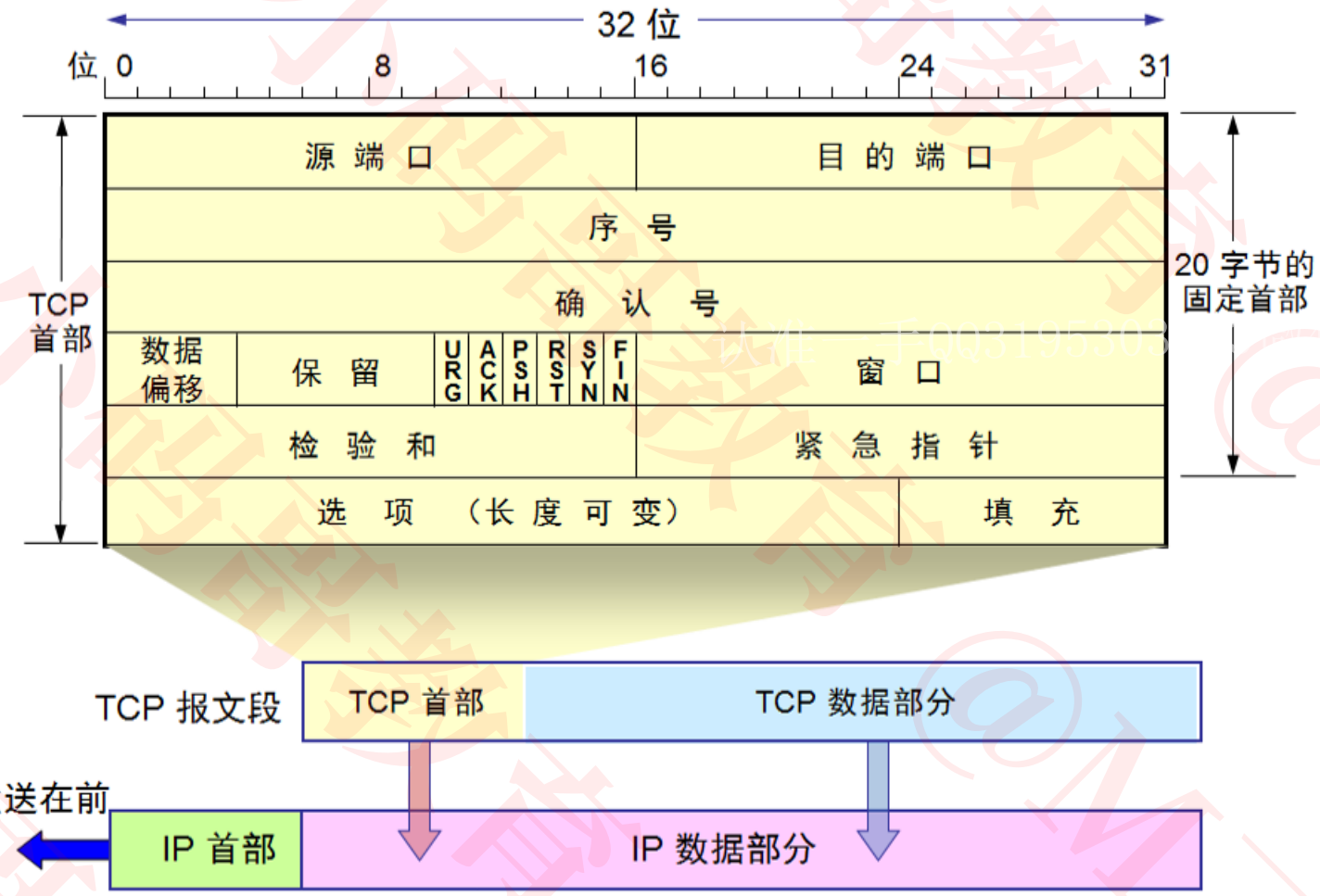
- 客户端的源端口是临时开启的随机端口

- 防火墙可以设置开启\关闭某些端口来提高安全性

- 常用命令行
  - netstat –an：查看被占用的端口
  - netstat –anb：查看被占用的端口、占用端口的应用程序
  - telnet 主机 端口：查看是否可以访问主机的某个端口
    - ✓安装telnet：控制面板 – 程序 – 启用或关闭Windows功能 – 勾选“Telnet Client” – 确定

协议	默认端口号
HTTP	TCP + 80
HTTPS	TCP + 443
FTP	TCP + 21
MySQL	TCP + 3306
DNS	UDP\TCP + 53
SMTP	TCP + 25
POP3	TCP + 110

TCP — 数据格式



- 数据偏移
  - 占4位，取值范围是0x0101~0x1111
  - 乘以4：首部长度（Header Length）
  - 首部长度是20~60字节
- 保留
  - 占6位，目前全为0

TCP – 小细节

TCP Segment Header Format

Bit #	0 – 7	8 – 15	16 – 23	24 – 31
0	Source Port		Destination Port	
32	Sequence Number			
64	Acknowledgment Number			
96	Data Offset	Res	Flags	Window Size
128	Header and Data Checksum		Urgent Pointer	
160...	Options			

UDP Datagram Header Format

Bit #	0 – 7	8 – 15	16 – 23	24 – 31
0	Source Port		Destination Port	
32	Length		Header and Data Checksum	

- 有些资料中，TCP首部的保留（Reserved）字段占3位，标志（Flags）字段占9位
  - Wireshark中也是如此

TCP – 一个细节

- UDP的首部中有个16位的字段记录了整个UDP报文段的长度（首部+数据）
- 但是，TCP的首部中仅仅有个4位的字段记录了TCP报文段的首部长度，并没有字段记录TCP报文段的数据长度

- 分析
  - UDP首部中占16位的长度字段是冗余的，纯粹是为了保证首部是32bit对齐
  - TCP\UDP的数据长度，完全可以由IP数据包的首部推测出来
    - ✓ 传输层的数据长度 = 网络层的总长度 – 网络层的首部长度 – 传输层的首部长度

TCP – 检验和（Checksum）

- 跟UDP一样，TCP检验和的计算内容：伪首部 + 首部 + 数据
- 伪首部：占用12字节，仅在计算检验和时起作用，并不会传递给网络层

TCP pseudo-header for checksum computation (IPv4)

Bit offset	0 – 3	4 – 7	8 – 15	16 – 31
0	Source address			
32	Destination address			
64	Zeros		Protocol	TCP length
96	Source port			Destination port
128	Sequence number			
160	Acknowledgement number			
192	Data offset	Reserved	Flags	Window
224	Checksum			Urgent pointer
256	Options (optional)			
256/288+	Data			

TCP – 标志位（Flags）

- URG（Urgent）
  - 当URG=1时，紧急指针字段才有效。表明当前报文段中有紧急数据，应优先尽快传送

- ACK（Acknowledgment）
  - 当ACK=1时，确认号字段才有效

- PSH（Push）

- RST（Reset）
  - 当RST=1时，表明连接中出现严重差错，必须释放连接，然后再重新建立连接

TCP – 标志位（Flags）

- SYN（Synchronization）
  - 当SYN=1、ACK=0时，表明这是一个建立连接的请求
  - 若对方同意建立连接，则回复SYN=1、ACK=1

- FIN（Finish）
  - 当FIN=1时，表明数据已经发送完毕，要求释放连接

TCP – 序号、确认号、窗口

- 序号（Sequence Number）
  - 占4字节
  - 首先，在传输过程的每一个字节都会有一个编号
  - 在建立连接后，序号代表：这一次传给对方的TCP数据部分的第一个字节的编号

- 确认号（Acknowledgment Number）
  - 占4字节
  - 在建立连接后，确认号代表：期望对方下一次传过来的TCP数据部分的第一个字节的编号

- 窗口（Window）
  - 占2字节
  - 这个字段有流量控制功能，用以告知对方下一次允许发送的数据大小（字节为单位）

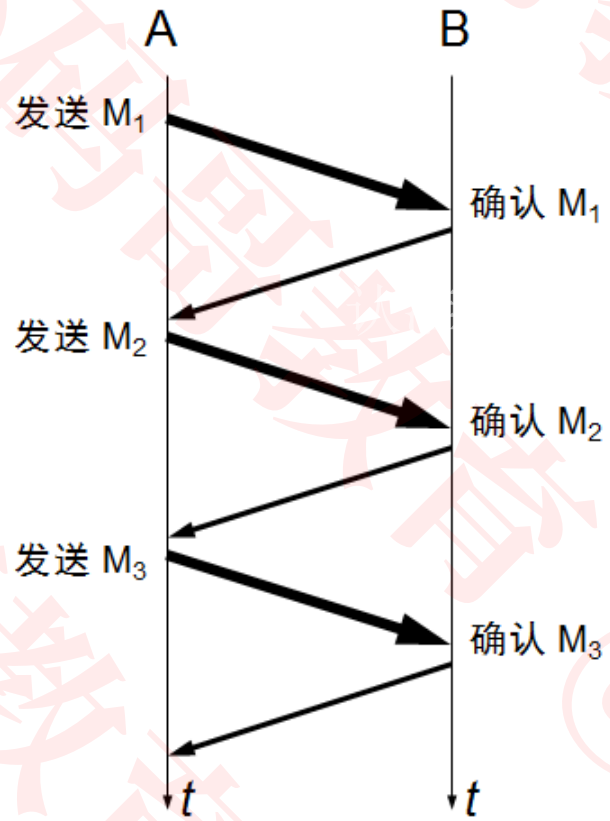
小码哥教育 SEEMYGO

TCP的几个要点

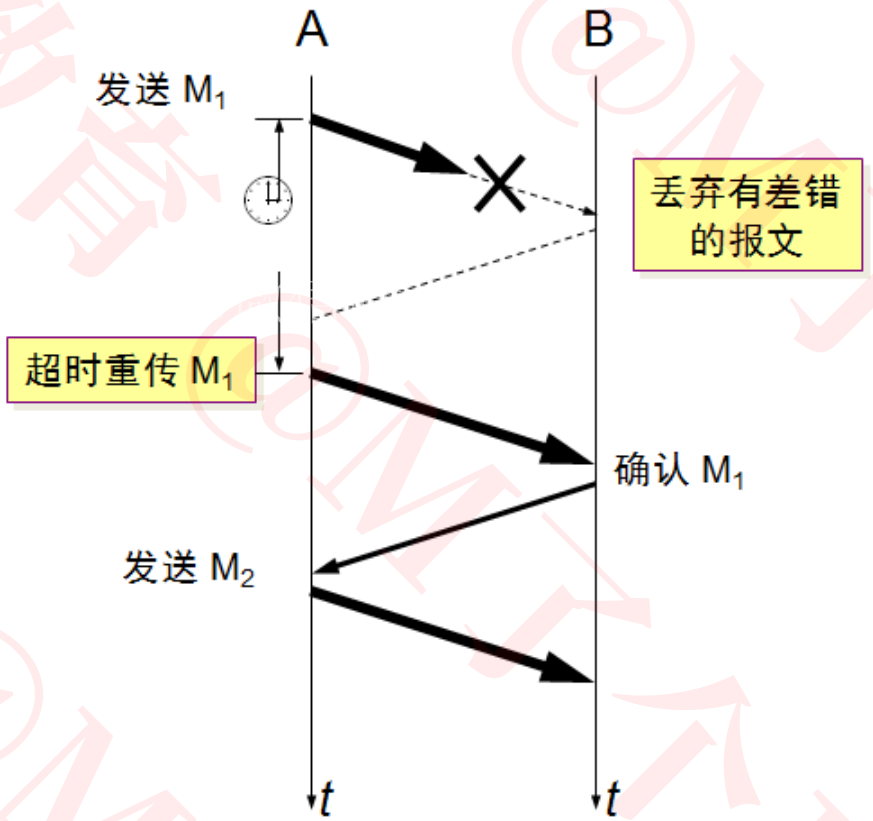
- 可靠传输
- 流量控制
- 拥塞控制
- 连接管理
  - 建立连接
  - 释放连接

TCP – 可靠传输 – 停止等待ARQ协议

■ ARQ（Automatic Repeat–reQuest），自动重传请求

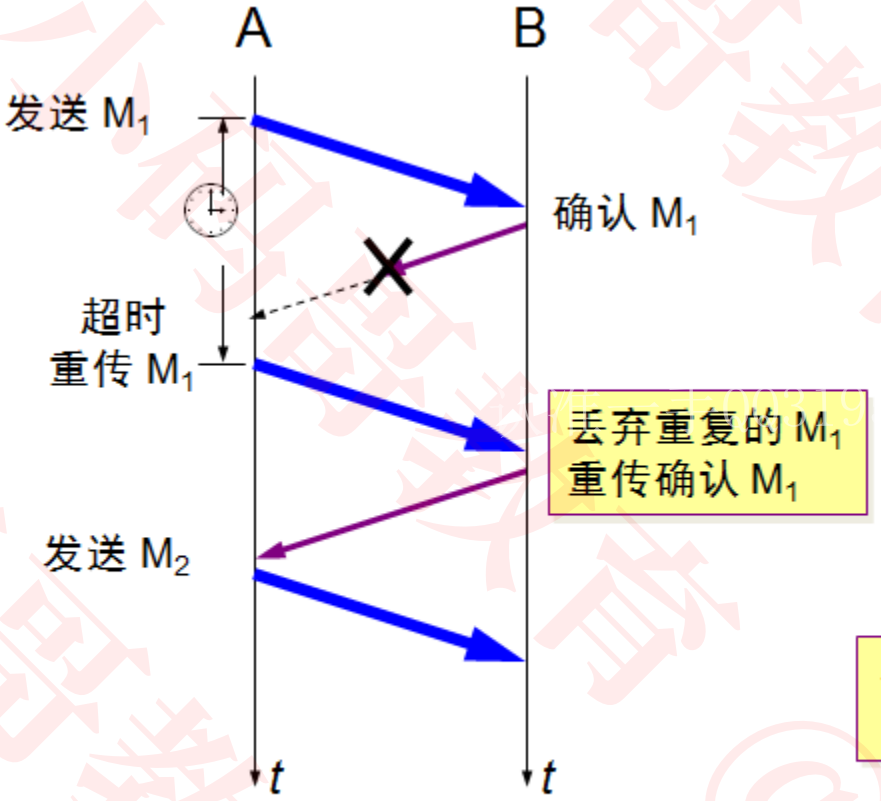


(a) 无差错情况

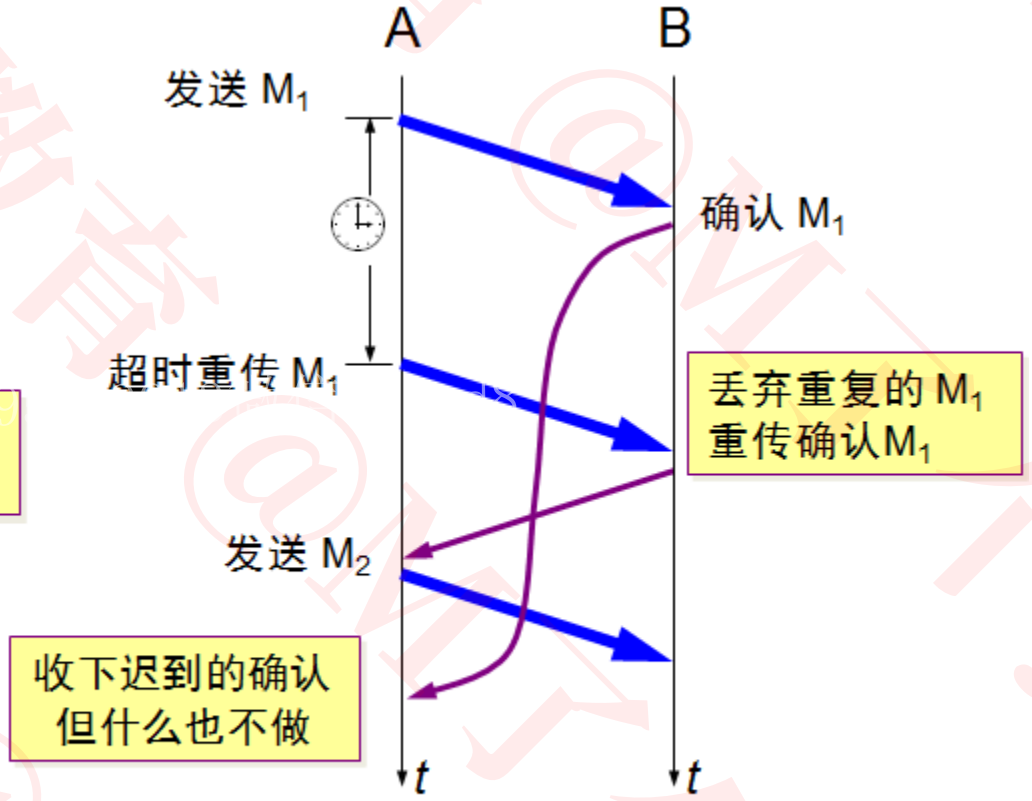


(b) 超时重传

TCP – 可靠传输 – 停止等待ARQ协议



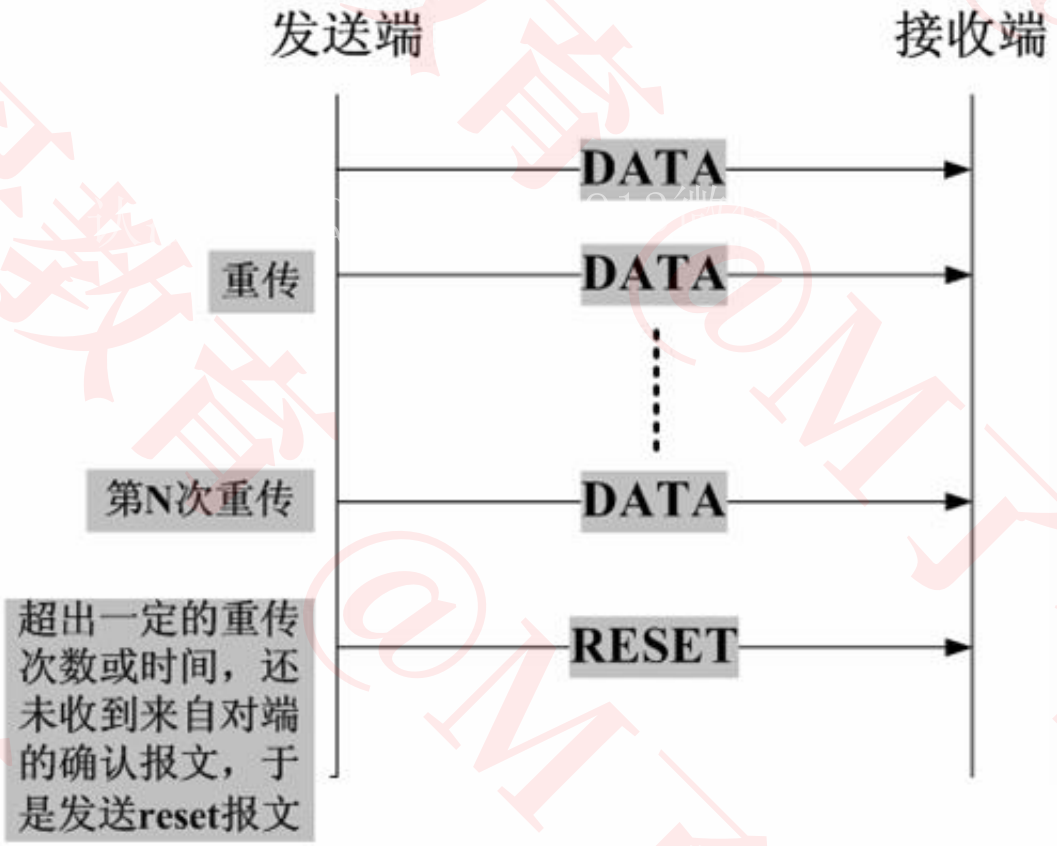
(a) 确认丢失



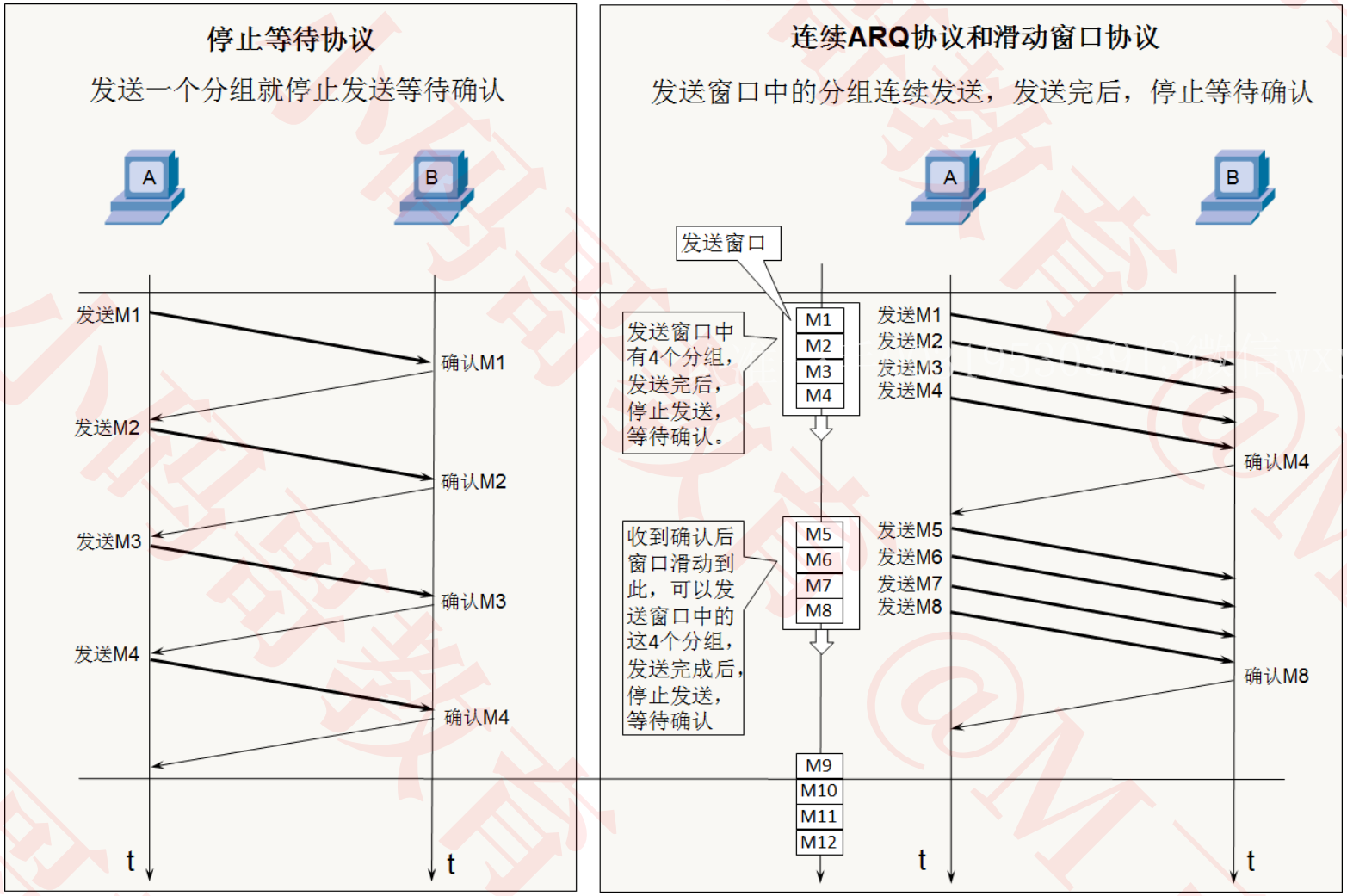
(b) 确认迟到

疑问

- 若有个包重传了N次还是失败，会一直持续重传到成功为止么？
- 这个取决于系统的设置，比如有些系统，重传5次还未成功就会发送reset报文（RST）断开TCP连接



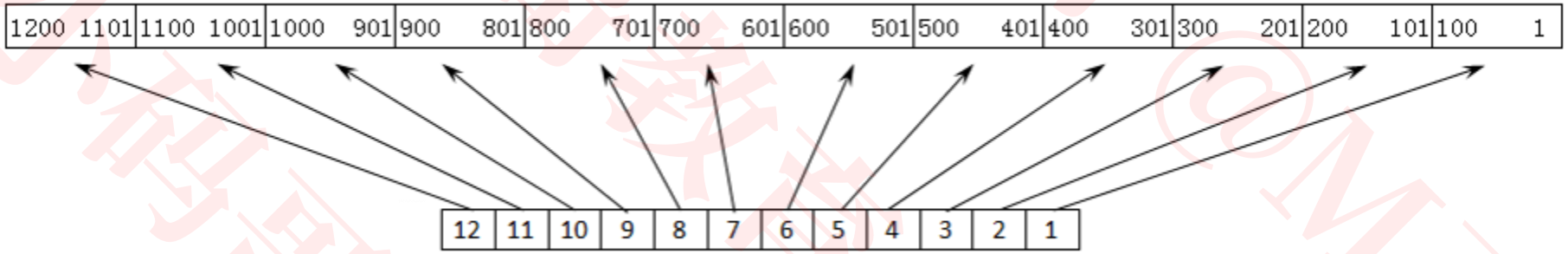
TCP – 可靠传输 – 连续ARQ协议 + 滑动窗口协议



- 如果接收窗口最多能接收4个包
  - 但发送方只发了2个包

- 接收方如何确定后面还有没有2个包?
  - 等待一定时间后没有第3个包
  - 就会返回确认收到2个包给发送方

TCP – 可靠传输 – 连续ARQ协议 + 滑动窗口协议



- 现在假设每一组数据是100个字节，代表一个数据段的数据
- 每一组给一个编号

TCP – 可靠传输 – SACK（选择性确认）

- 在TCP通信过程中，如果发送序列中间某个数据包丢失（比如1、2、3、4、5中的3丢失了）
- TCP会通过重传最后确认的分组后续的分组（最后确认的是2，会重传3、4、5）
- 这样原先已经正确传输的分组也可能重复发送（比如4、5），降低了TCP性能

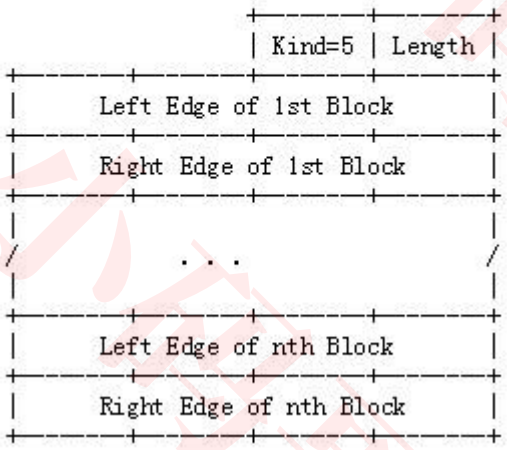
- 为改善上述情况，发展出了SACK（Selective acknowledgment，选择性确认）技术
  - 告诉发送方哪些数据丢失，哪些数据已经提前收到
  - 使TCP只重新发送丢失的包（比如3），不用发送后续所有的分组（比如4、5）

TCP – 可靠传输 – SACK（选择性确认）

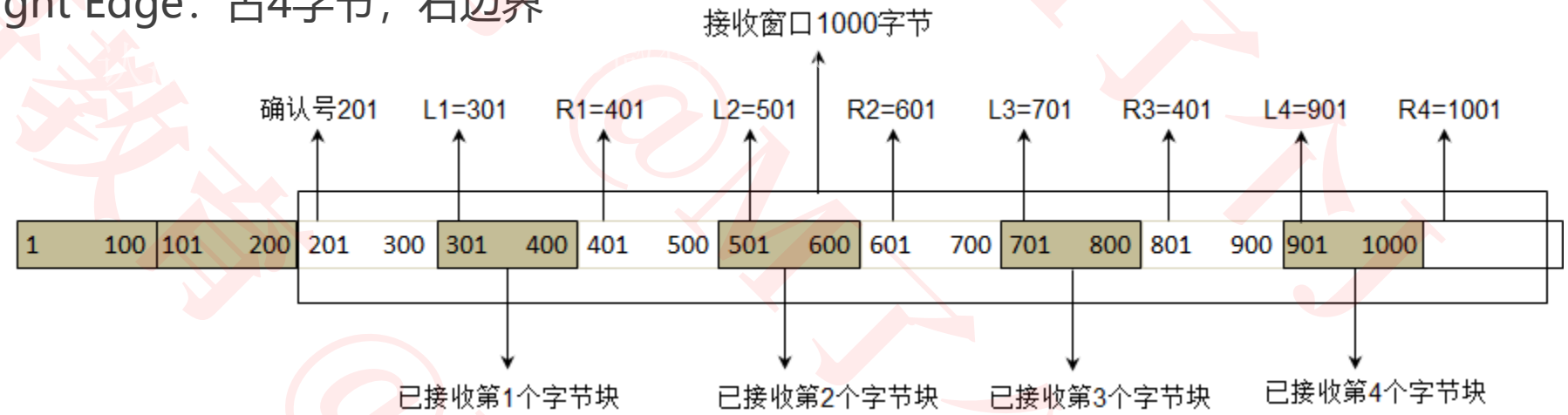
TCP SACK Option:

Kind: 5

Length: Variable



- SACK信息会放在TCP首部的选项部分
  - Kind：占1字节。值为5代表这是SACK选项
  - Length：占1字节。表明SACK选项一共占用多少字节
  - Left Edge：占4字节，左边界
  - Right Edge：占4字节，右边界



- 一对边界信息需要占用8字节，由于TCP首部的选项部分最多40字节，所以
  - SACK选项最多携带4组边界信息
  - SACK选项的最大占用字节数 = 4 * 8 + 2 = 34

思考一个问题

- 为什么选择在传输层就将数据“大卸八块”分成多个段，而不是等到网络层再分片传递给数据链路层?
  - 因为可以提高重传的性能
  - 需要明确的是：可靠传输是在传输层进行控制的
    - ✓ 如果在传输层不分段，一旦出现数据丢失，整个传输层的数据都得重传
    - ✓ 如果在传输层分了段，一旦出现数据丢失，只需要重传丢失的那些段即可

TCP – 流量控制

- 如果接收方的缓存区满了，发送方还在疯狂着发送数据
  - 接收方只能把收到的数据包丢掉，大量的丢包会极大着浪费网络资源
  - 所以要进行流量控制

- 什么是流量控制?
  - 让发送方的发送速率不要太快，让接收方来得及接收处理

- 原理
  - 通过确认报文中窗口字段来控制发送方的发送速率
  - 发送方的发送窗口大小不能超过接收方给出窗口大小
  - 当发送方收到接收窗口的大小为0时，发送方就会停止发送数据

小码哥教育 SEEMYGO

TCP – 流量控制 – 特殊情况

- 有一种特殊情况
  - 一开始，接收方给发送方发送了0窗口的报文段
  - 后面，接收方又有了一些存储空间，给发送方发送的非0窗口的报文段丢失了
  - 发送方的发送窗口一直为零，双方陷入僵局

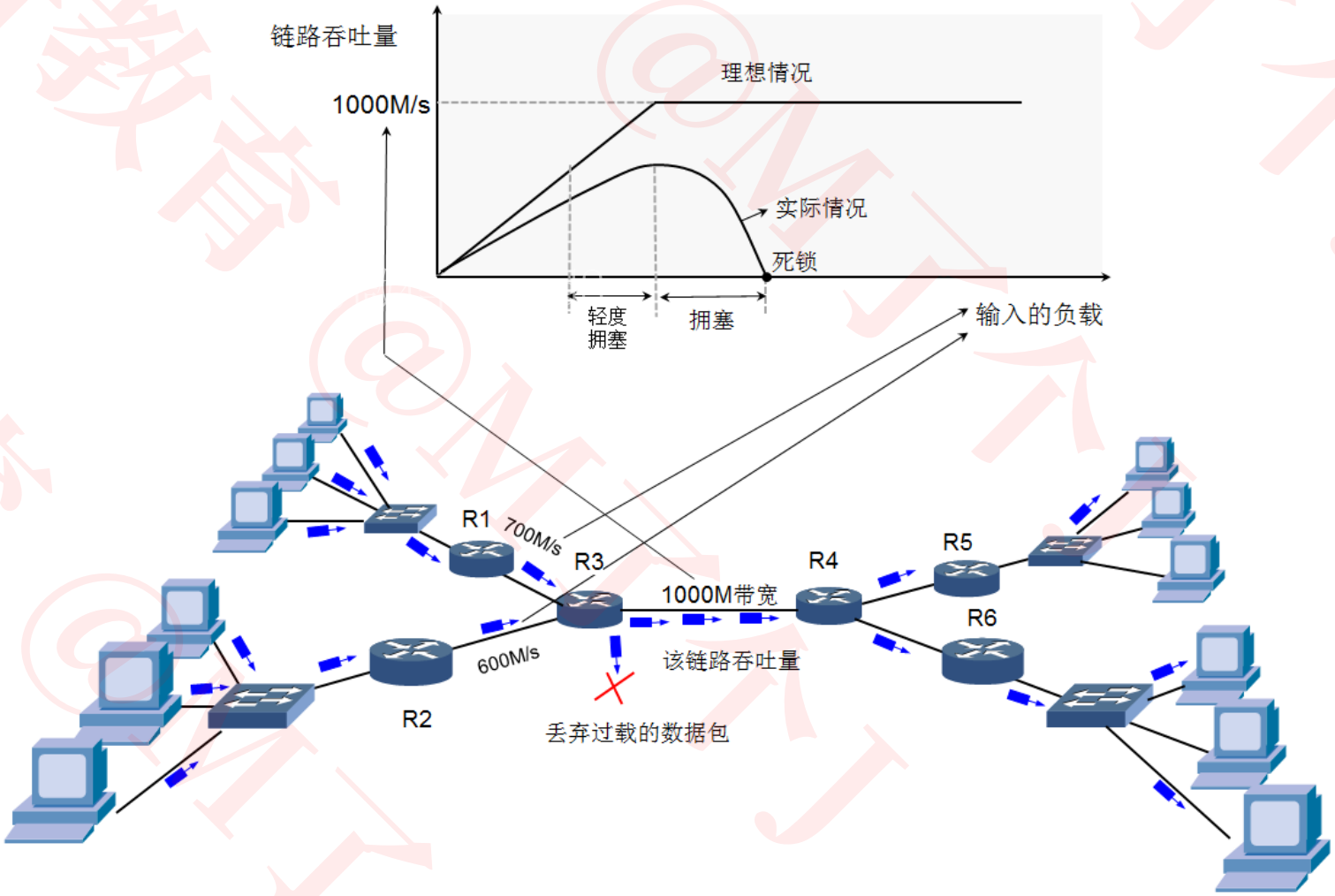
- 解决方案
  - 当发送方收到0窗口通知时，这时发送方停止发送报文
  - 并且同时开启一个定时器，隔一段时间就发个测试报文去询问接收方最新的窗口大小
  - 如果接收的窗口大小还是为0，则发送方再次刷新启动定时器

TCP – 拥塞控制

- 拥塞控制
  - 防止过多的数据注入到网络中
  - 避免网络中的路由器或链路过载

- 拥塞控制是一个全局性的过程
  - 涉及到所有的主机、路由器
  - 以及与降低网络传输性能有关的所有因素
  - 是大家共同努力的结果

- 相比而言，流量控制是点对点通信的控制

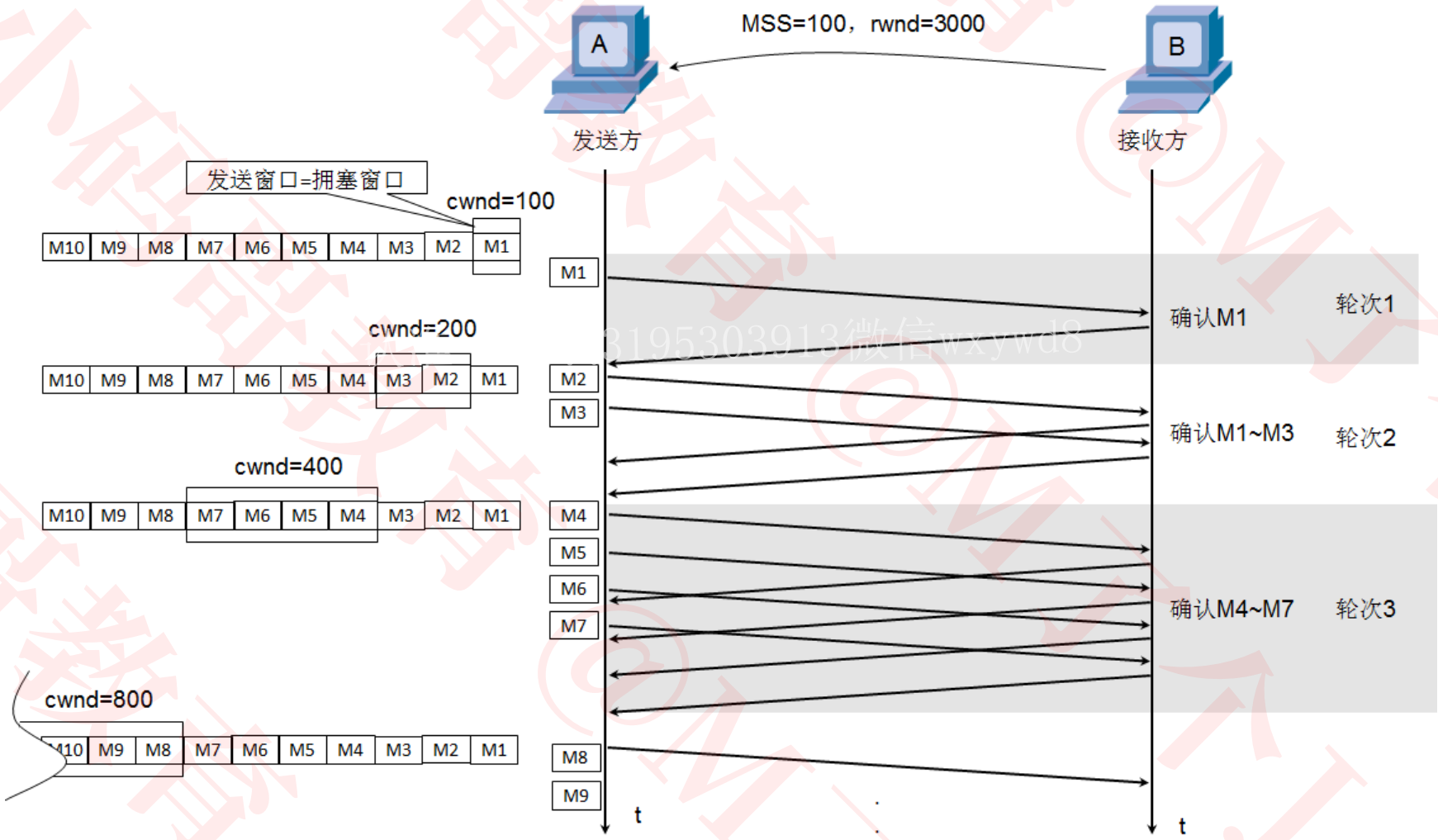


TCP – 拥塞控制 – 方法

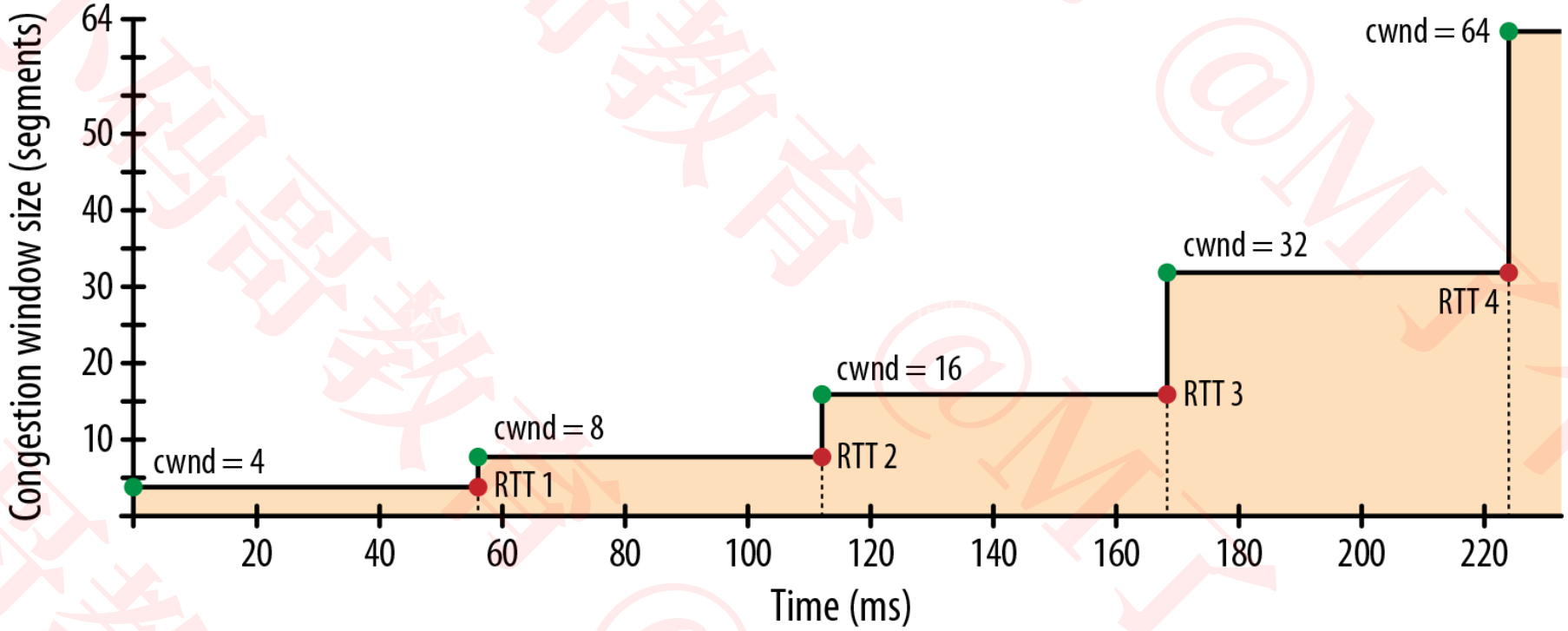
- 慢开始（slow start，慢启动）
- 拥塞避免（congestion avoidance）
- 快速重传（fast retransmit）
- 快速恢复（fast recovery）

- 几个缩写
  - MSS（Maximum Segment Size）：每个段最大的数据部分大小
    - ✓在建立连接时确定
  - cwnd（congestion window）：拥塞窗口
  - rwnd（receive window）：接收窗口
  - swnd（send window）：发送窗口
    - ✓swnd = min(cwnd, rwnd)

TCP – 拥塞控制 – 慢开始

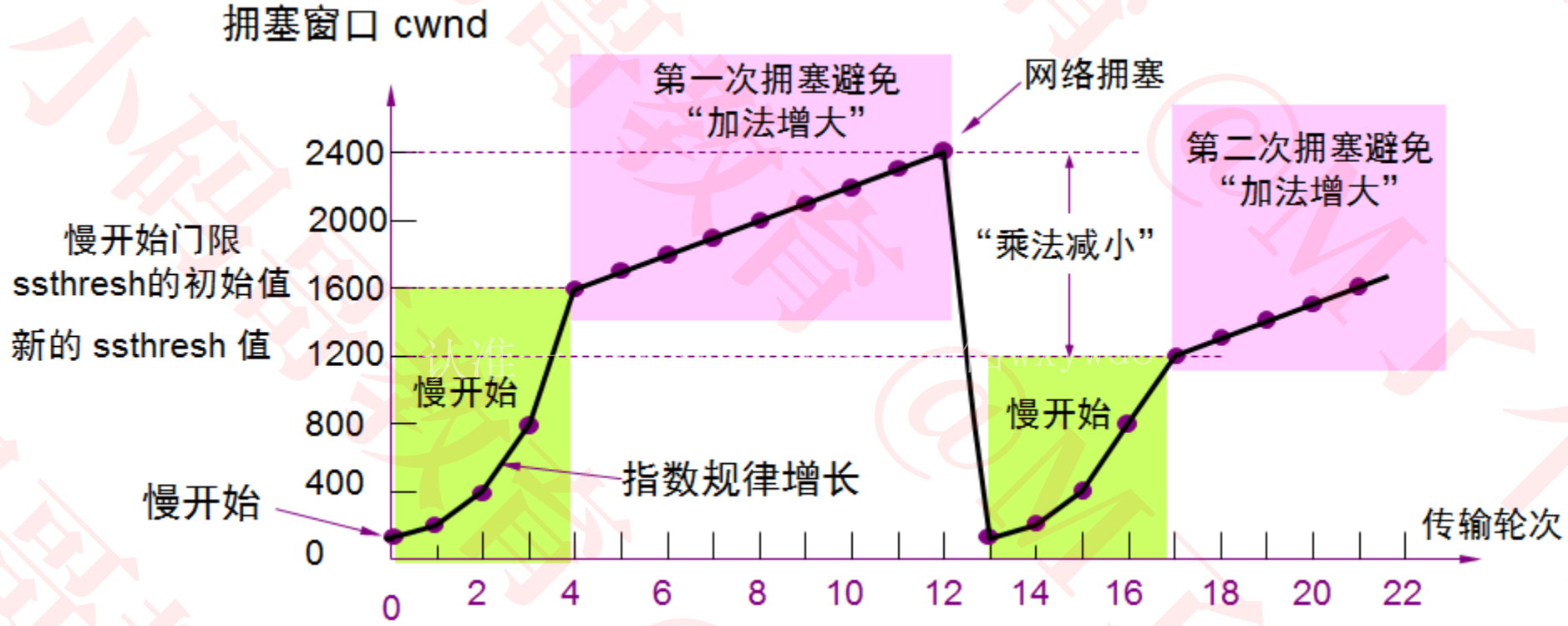

A
B
MSS=100，rwnd=3000
发送方
接收方
发送窗口=拥塞窗口
cwnd=100
M10 M9 M8 M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1
cwnd=200
M10 M9 M8 M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1
cwnd=400
M10 M9 M8 M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1
cwnd=800
M10 M9 M8 M7 M6 M5 M4 M3 M2 M1
M1
M2
M3
M4
M5
M6
M7
M8
M9
确认M1
轮次1
确认M1~M3
轮次2
确认M4~M7
轮次3
t
t

TCP – 拥塞控制 – 慢开始



- cwnd的初始值比较小，然后随着数据包被接收方确认（收到一个ACK）
  - cwnd就成倍增长（指数级）

TCP – 拥塞控制 – 拥塞避免



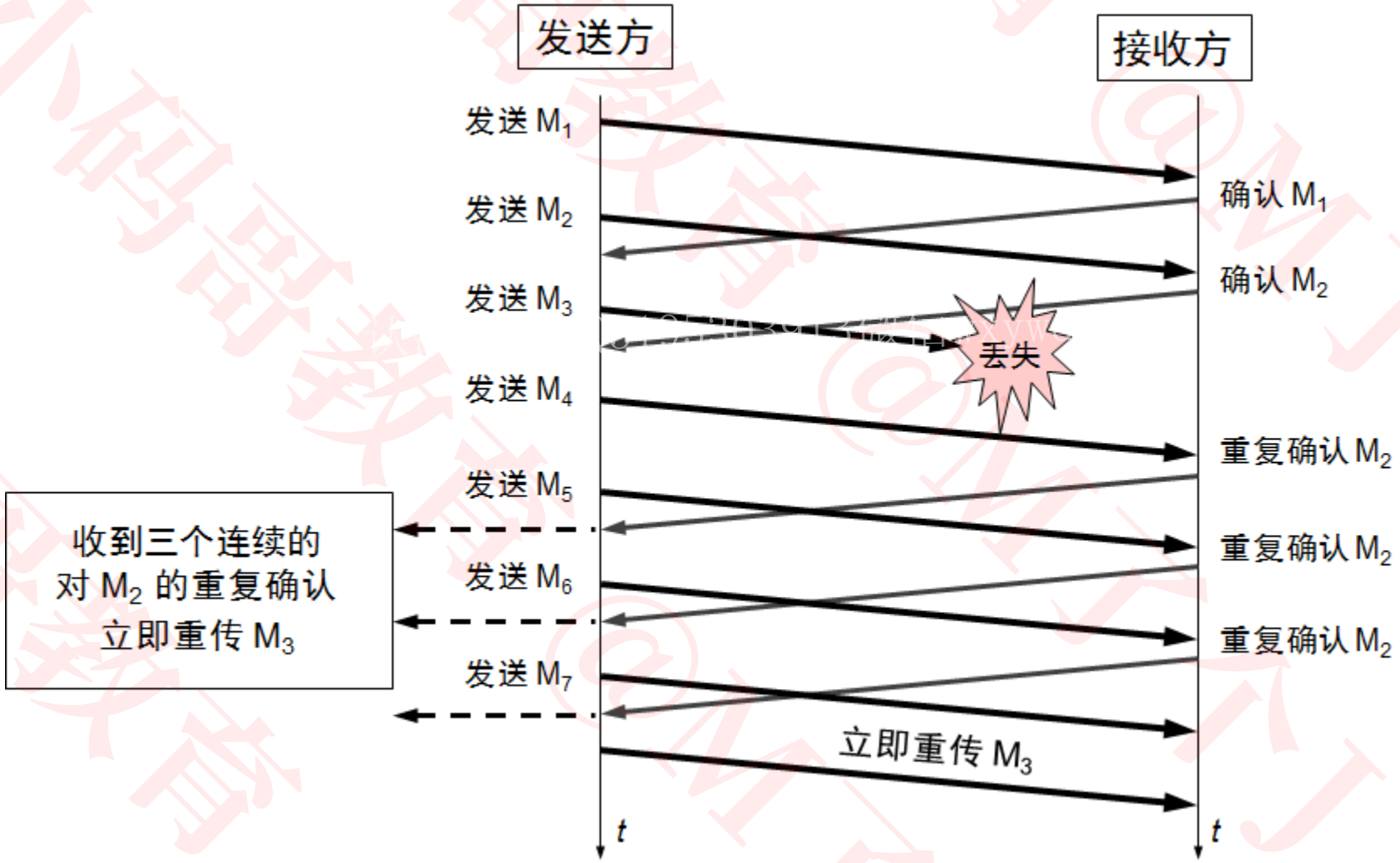
- ssthresh（slow start threshold）：慢开始阈值，cwnd达到阈值后，以线性方式增加
- 拥塞避免（加法增大）：拥塞窗口缓慢增大，以防止网络过早出现拥塞
- 乘法减小：只要网络出现拥塞，把ssthresh减为拥塞峰值的一半，同时执行慢开始算法（cwnd又恢复到初始值）
- 当网络出现频繁拥塞时，ssthresh值就下降的很快

TCP – 拥塞控制 – 快重传

- 接收方
  - 每收到一个失序的分组后就立即发出重复确认
  - 使发送方及时知道有分组没有到达
  - 而不要等待自己发送数据时才进行确认

- 发送方
  - 只要连续收到三个重复确认（总共4个相同的确认），就应当立即重传对方尚未收到的报文段
  - 而不必继续等待重传计时器到期后再重传

TCP – 拥塞控制 – 快重传

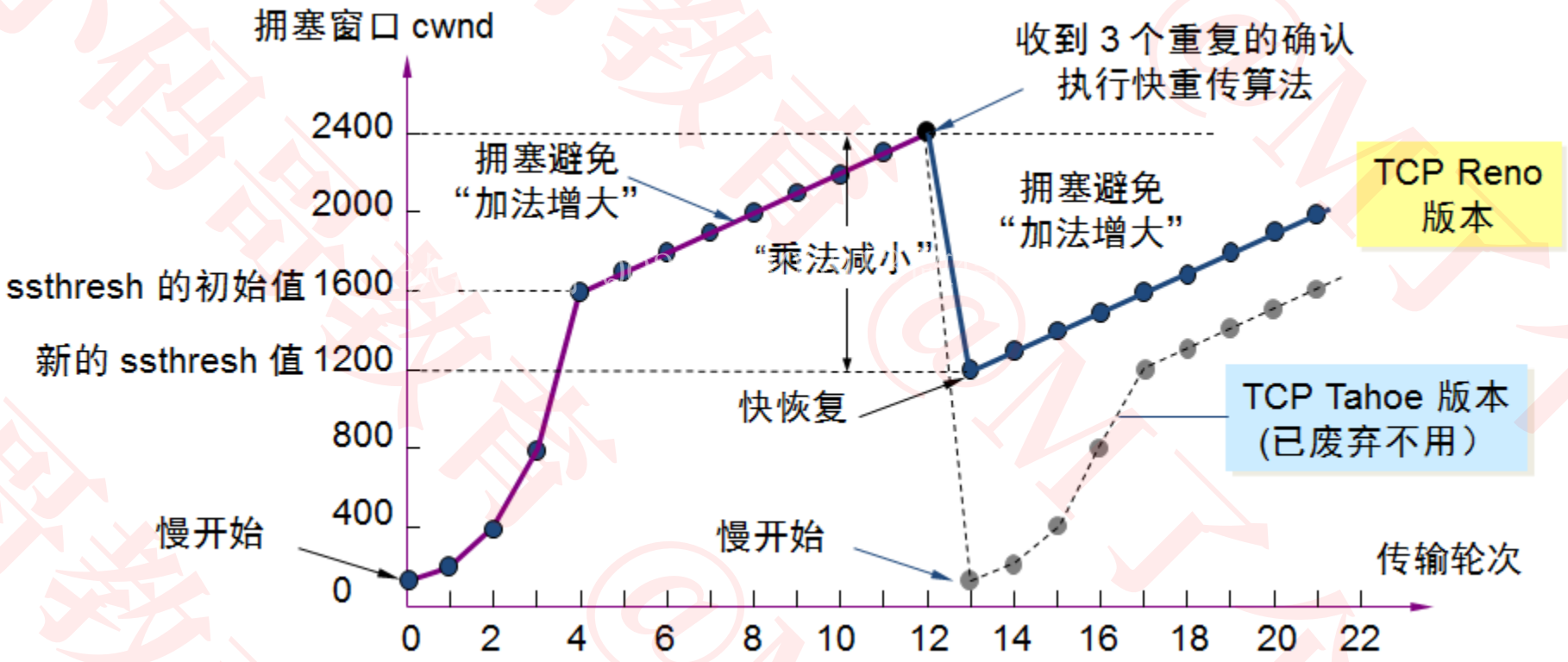

发送方
接收方
发送 M_1
发送 M_2
发送 M_3
发送 M_4
发送 M_5
发送 M_6
发送 M_7
确认 M_1
确认 M_2
丢失
重复确认 M_2
重复确认 M_2
重复确认 M_2
收到三个连续的
对 M_2 的重复确认
立即重传 M_3
立即重传 M_3
t
t

TCP – 拥塞控制 – 快恢复

- 当发送方连续收到三个重复确认，说明网络出现拥塞
  - 就执行“乘法减小”算法，把ssthresh减为拥塞峰值的一半

- 与慢开始不同之处是现在不执行慢开始算法，即cwnd现在不恢复到初始值
  - 而是把cwnd值设置为新的ssthresh值（减小后的值）
  - 然后开始执行拥塞避免算法（“加法增大”），使拥塞窗口缓慢地线性增大

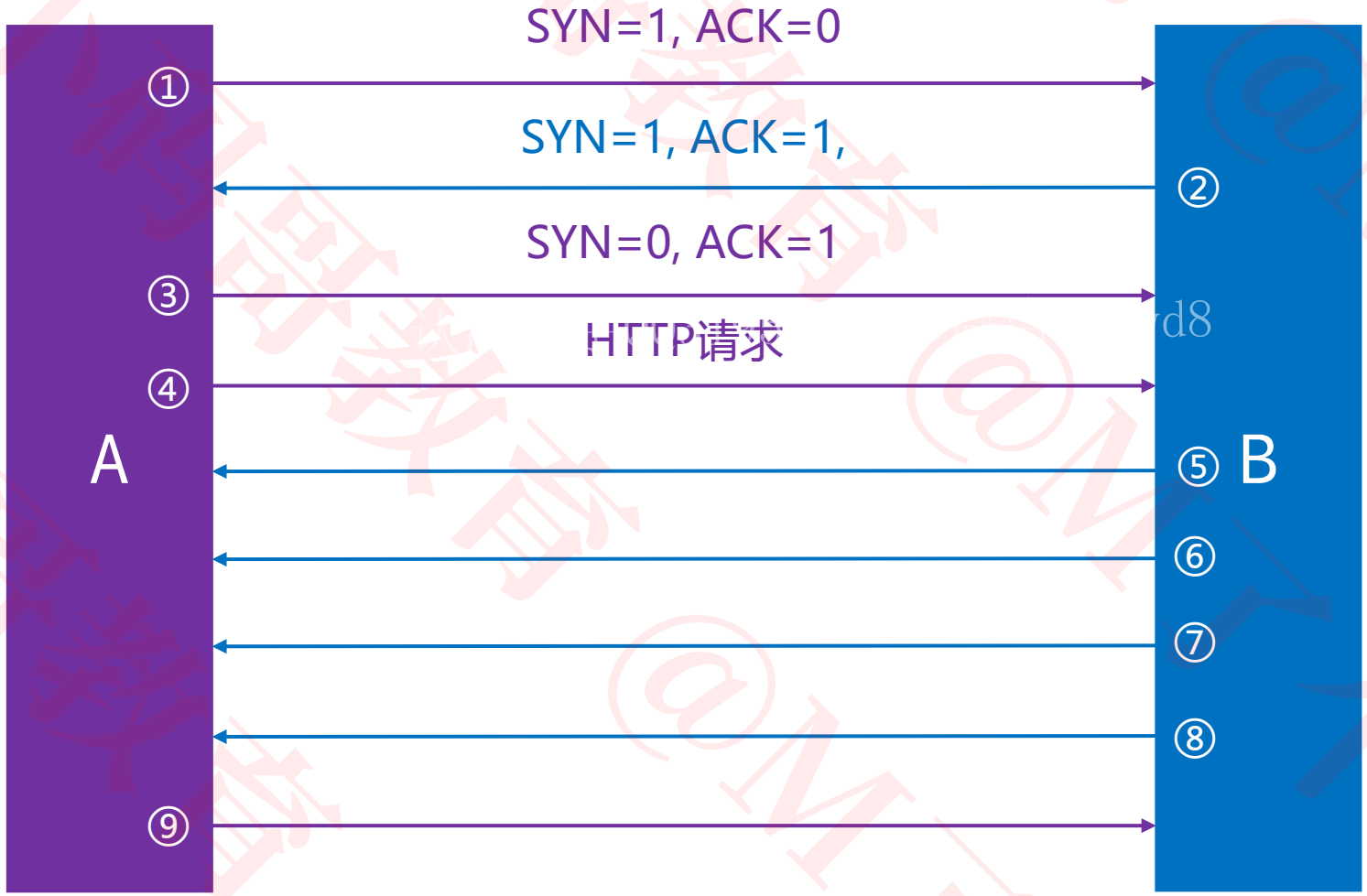
TCP – 拥塞控制 – 快重传 + 快恢复



TCP – 拥塞控制 – 发送窗口的最大值

- 发送窗口的最大值：swnd = min(cwnd, rwnd)
- 当rwnd < cwnd时，是接收方的接收能力限制发送窗口的最大值
- 当cwnd < rwnd时，则是网络的拥塞限制发送窗口的最大值

TCP – 序号、确认号



小码哥教育 SEEMYGO

TCP – 序号、确认号

①：TCP数据部分占0字节		
SYN=1，ACK=0	seq	ack
原生	s1	0
相对	0	0

②：TCP数据部分占0字节		
SYN=1，ACK=1	seq	ack
原生	s2	s1 + 1
相对	0	1

③：TCP数据部分占0字节		
SYN=0，ACK=1	seq	ack
原生	s1 + 1	s2 + 1
相对	1	1

④：TCP数据部分占k字节（HTTP）		
SYN=0，ACK=1	seq	ack
原生	s1 + 1	s2 + 1
相对	1	1

TCP – 序号、确认号

⑤：TCP数据部分占b1字节		
SYN=0 ACK=1	seq	ack
原生	s2 + 1	s1 + k + 1
相对	1	k + 1

⑦：TCP数据部分占b3字节		
SYN=0 ACK=1	seq	ack
原生	s2 + b1 + b2 + 1	s1 + k + 1
相对	b1 + b2 + 1	k + 1

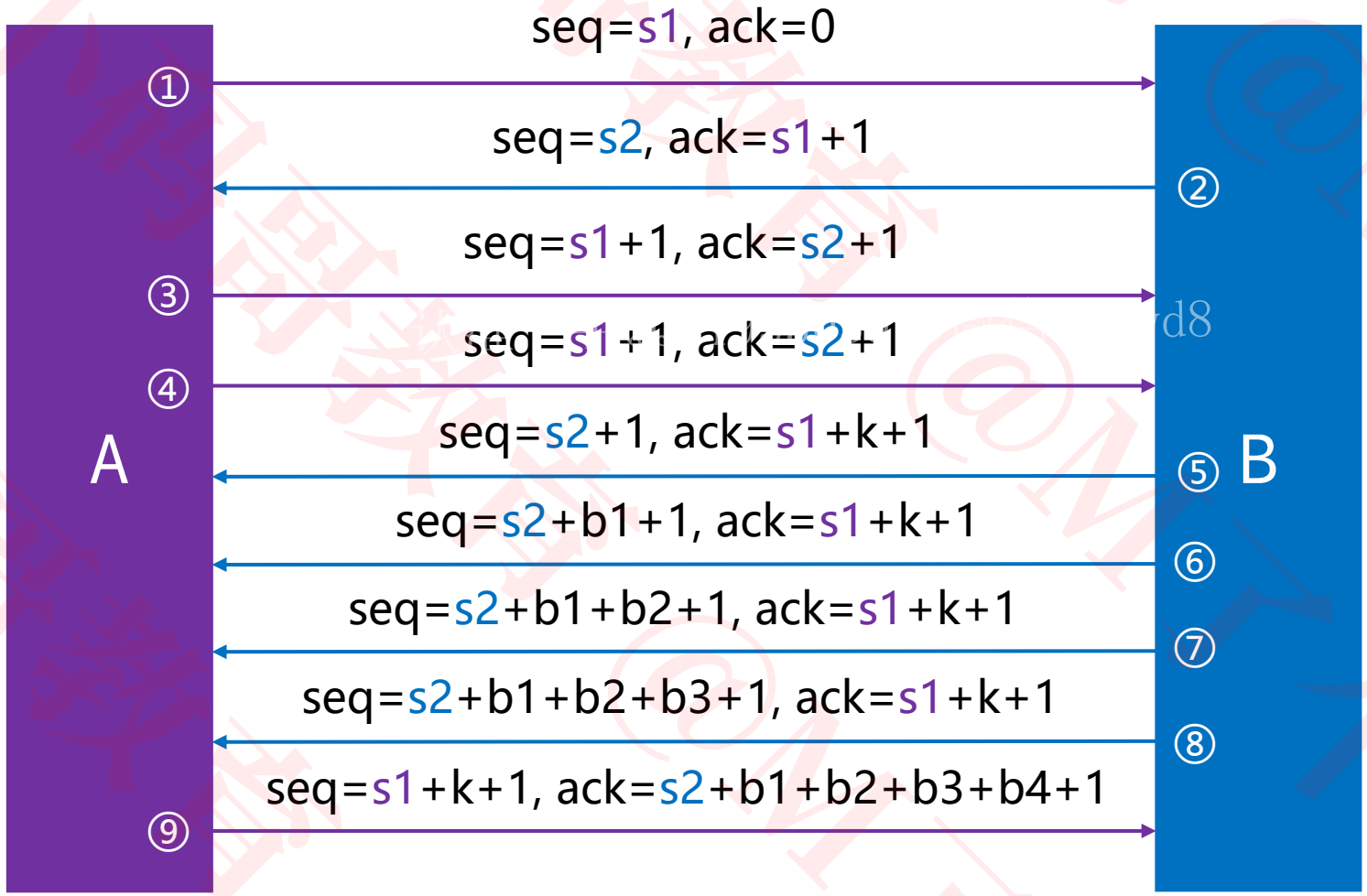
⑥：TCP数据部分占b2字节		
SYN=0 ACK=1	seq	ack
原生	s2 + b1 + 1	s1 + k + 1
相对	b1 + 1	k + 1

⑧：TCP数据部分占b4字节		
SYN=0 ACK=1	seq	ack
原生	s2 + b1 + b2 + b3 + 1	s1 + k + 1
相对	b1 + b2 + b3 + 1	k + 1

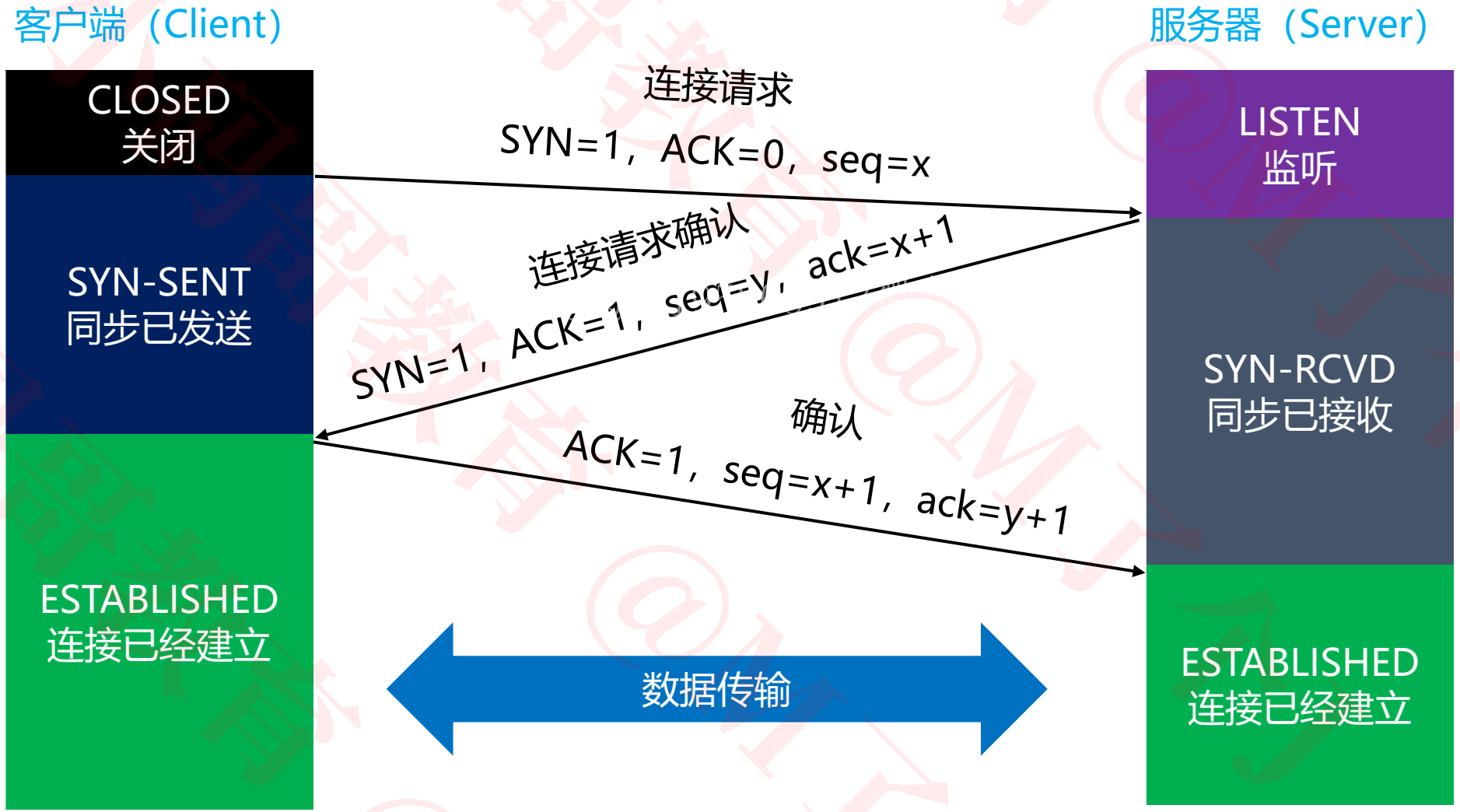
TCP – 序号、确认号

⑨：连续收到了对方的4个TCP数据段，TCP数据部分占0字节		
SYN=0 ACK=1	seq	ack
原生	s1 + k + 1	s2 + b1 + b2 + b3 + b4 + 1
相对	k + 1	b1 + b2 + b3 + b4 + 1

TCP – 序号、确认号


A
B
①
seq=s1, ack=0
②
seq=s2, ack=s1+1
③
seq=s1+1, ack=s2+1
④
seq=s1+1, ack=s2+1
⑤
seq=s2+1, ack=s1+k+1
⑥
seq=s2+b1+1, ack=s1+k+1
⑦
seq=s2+b1+b2+1, ack=s1+k+1
⑧
seq=s2+b1+b2+b3+1, ack=s1+k+1
⑨
seq=s1+k+1, ack=s2+b1+b2+b3+b4+1

TCP – 建立连接 – 3次握手



TCP – 建立连接 – 状态解读

- CLOSED：client处于关闭状态
- LISTEN：server处于监听状态，等待client连接
- SYN-RCVD：表示server接受到了SYN报文，当收到client的ACK报文后，它会进入到ESTABLISHED状态
- SYN-SENT：表示client已发送SYN报文，等待server的第2次握手
- ESTABLISHED：表示连接已经建立

TCP – 建立连接 – 前2次握手的特点

- SYN都设置为1
- 数据部分的长度都为0
- TCP头部的长度一般是32字节
  - 固定头部：20字节
  - 选项部分：12字节
- 双方会交换确认一些信息
  - 比如MSS、是否支持SACK、Window scale（窗口缩放系数）等
  - 这些数据都放在了TCP头部的选项部分中（12字节）

TCP – 建立连接 – 疑问

- 为什么建立连接的时候，要进行3次握手？2次不行么？
  - 主要目的：防止server端一直等待，浪费资源

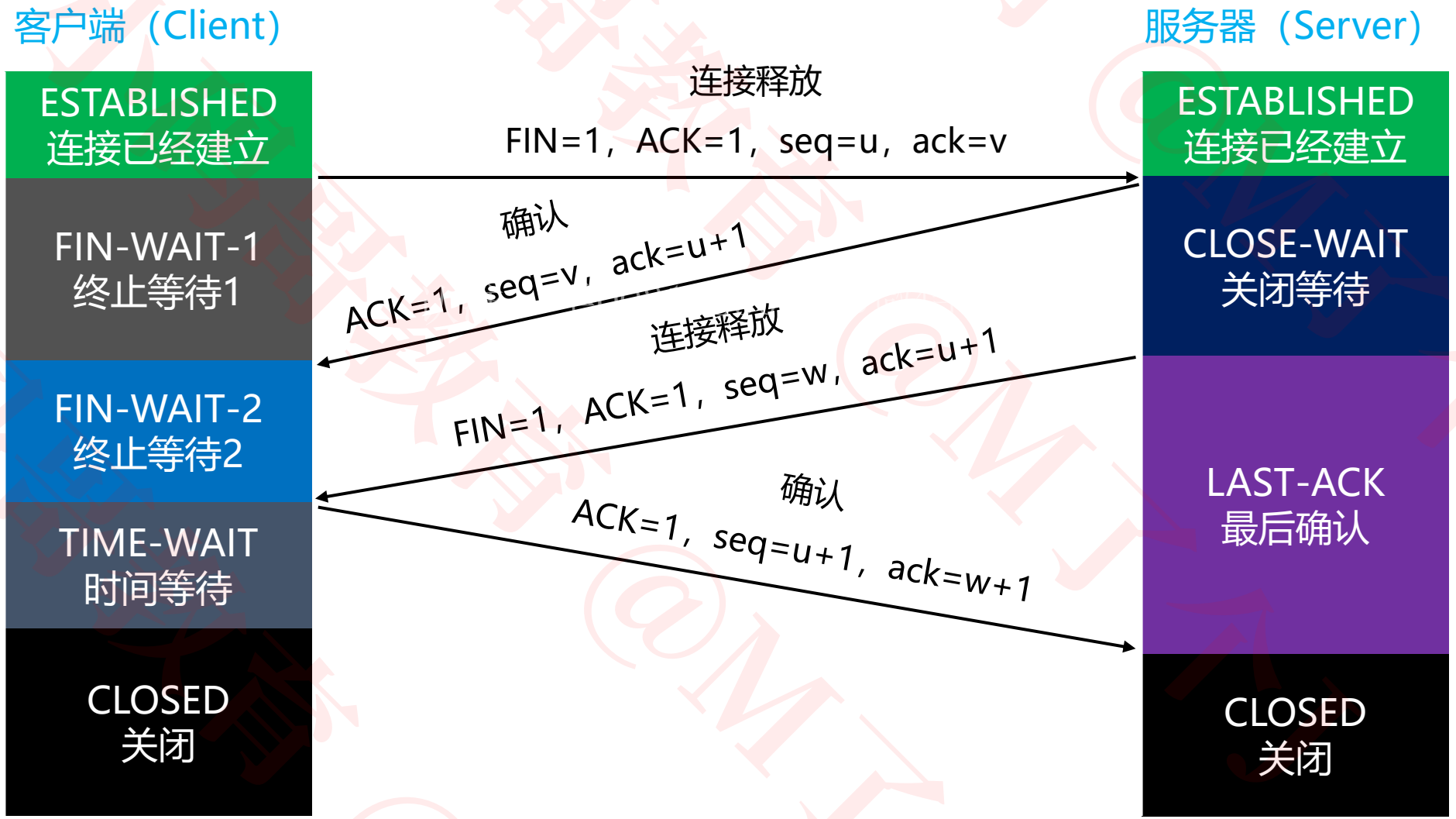
- 如果建立连接只需要2次握手，可能会出现的情况
  - 假设client发出的第一个连接请求报文段，因为网络延迟，在连接释放以后的某个时间才到达server
  - 本来这是一个早已失效的连接请求，但server收到此失效的请求后，误认为是client再次发出的一个新的连接请求
  - 于是server就向client发出确认报文段，同意建立连接
  - 如果不采用“3次握手”，那么只要server发出确认，新的连接就建立了
  - 由于现在client并没有真正想连接服务器的意愿，因此不会理睬server的确认，也不会向server发送数据
  - 但server却以为新的连接已经建立，并一直等待client发来数据，这样，server的很多资源就白白浪费掉了

- 采用“三次握手”的办法可以防止上述现象发生
  - 例如上述情况，client没有向server的确认发出确认，server由于收不到确认，就知道client并没有要求建立连接

TCP – 建立连接 – 疑问

- 第3次握手失败了，会怎么处理?
  - 此时server的状态为SYN-RCVD，若等不到client的ACK，server会重新发送SYN+ACK包
  - 如果server多次重发SYN+ACK都等不到client的ACK，就会发送RST包，强制关闭连接

TCP – 释放连接 – 4次挥手



TCP – 释放连接 – 状态解读

- FIN-WAIT-1：表示想主动关闭连接
  - 向对方发送了FIN报文，此时进入到FIN-WAIT-1状态

- CLOSE-WAIT：表示在等待关闭
  - 当对方发送FIN给自己，自己会回应一个ACK报文给对方，此时则进入到CLOSE-WAIT状态
  - 在此状态下，需要考虑自己是否还有数据要发送给对方，如果没有，发送FIN报文给对方

- FIN-WAIT-2：只要对方发送ACK确认后，主动方就会处于FIN-WAIT-2状态，然后等待对方发送FIN报文

- CLOSING：一种比较罕见的例外状态
  - 表示你发送FIN报文后，并没有收到对方的ACK报文，反而却也收到了对方的FIN报文
  - 如果双方几乎在同时准备关闭连接的话，那么就出现了双方同时发送FIN报文的情况，也即会出现CLOSING状态
  - 表示双方都正在关闭连接

TCP – 释放连接 – 状态解读

- LAST-ACK：被动关闭一方在发送FIN报文后，最后等待对方的ACK报文
  - 当收到ACK报文后，即可进入CLOSED状态了

- TIME-WAIT：表示收到了对方的FIN报文，并发送出了ACK报文，就等2MSL后即可进入CLOSED状态了
  - 如果FIN-WAIT-1状态下，收到了对方同时带FIN标志和ACK标志的报文时
    - ✓ 可以直接进入到TIME-WAIT状态，而无须经过FIN-WAIT-2状态

- CLOSED：关闭状态

- 由于有些状态的时间比较短暂，所以很难用netstat命令看到，比如SYN-RCVD、FIN-WAIT-1等

TCP – 释放连接 – 细节

- TCP/IP协议栈在设计上，允许任何一方先发起断开请求。这里演示的是client主动要求断开

- client发送ACK后，需要有个TIME-WAIT阶段，等待一段时间后，再真正关闭连接
  - 一般是等待2倍的MSL（Maximum Segment Lifetime，最大分段生存期）
    - ✓ MSL是TCP报文在Internet上的最长生存时间
    - ✓ 每个具体的TCP实现都必须选择一个确定的MSL值，RFC 1122建议是2分钟
    - ✓ 可以防止本次连接中产生的数据包误传到下一次连接中（因为本次连接中的数据包都会在2MSL时间内消失了）

- 如果client发送ACK后马上释放了，然后又因为网络原因，server没有收到client的ACK，server就会重发FIN
  - 这时可能出现的情况是
    - ① client没有任何响应，服务器那边会干等，甚至多次重发FIN，浪费资源
    - ② client有个新的应用程序刚好分配了同一个端口号，新的应用程序收到FIN后马上开始执行断开连接的操作，本来它可能是想跟server建立连接的

TCP – 释放连接 – 疑问

- 为什么释放连接的时候，要进行4次挥手？
- TCP是全双工模式
- 第1次挥手：当主机1发出FIN报文段时
  - ✓ 表示主机1告诉主机2，主机1已经没有数据要发送了，但是，此时主机1还是可以接受来自主机2的数据
- 第2次挥手：当主机2返回ACK报文段时
  - ✓ 表示主机2已经知道主机1没有数据发送了，但是主机2还是可以发送数据到主机1的
- 第3次挥手：当主机2也发送了FIN报文段时
  - ✓ 表示主机2告诉主机1，主机2已经没有数据要发送了
- 第4次挥手：当主机1返回ACK报文段时
  - ✓ 表示主机1已经知道主机2没有数据发送了。随后正式断开整个TCP连接

TCP – 释放连接 – 抓包

- 有时候在使用抓包工具的时候，有可能只会看到“3次“挥手
  - 这其实是将第2、3次挥手合并了

```
192.168.3.3       113.96.140.220    TCP      54 6512 → 80 [FIN, ACK] Seq=661 Ack=9240 Win=262400 Len=0
113.96.140.220    192.168.3.3       TCP      60 80 → 6512 [FIN, ACK] Seq=9240 Ack=662 Win=11008 Len=0
192.168.3.3       113.96.140.220    TCP      54 6512 → 80 [ACK] Seq=662 Ack=9241 Win=262400 Len=0
```

- 当server接收到client的FIN时，如果server后面也没有数据要发送给client了
  - 这时，server就可以将第2、3次挥手合并，同时告诉client两件事
  - ✓ 已经知道client没有数据要发
  - ✓ server已经没有数据要发了