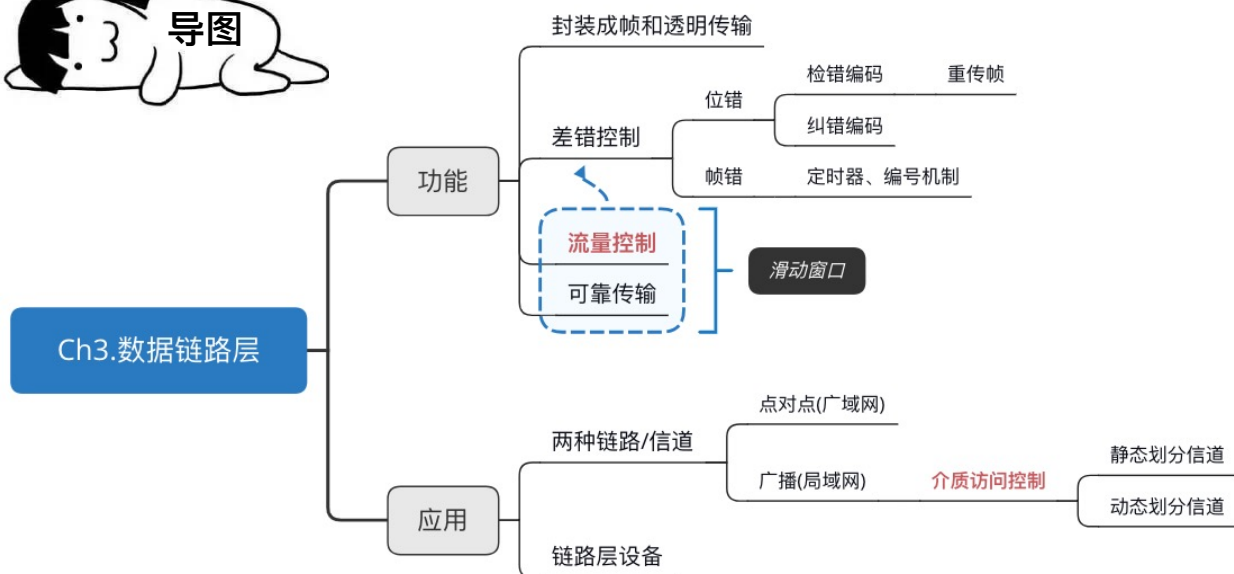


王道考研——计算机网络

WWW.CSKAOYAN.COM

第三章 数据链路层

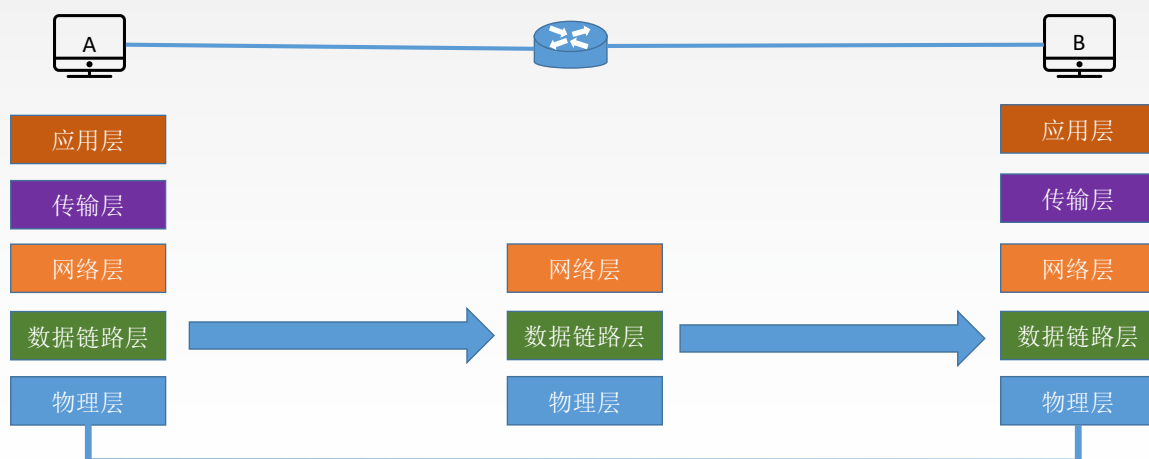


本节内容

数据链路层 功能概述

王道考研/CSKAOYAN.COM

数据链路层的研究思想



王道考研/CSKAOYAN.COM

数据链路层基本概念

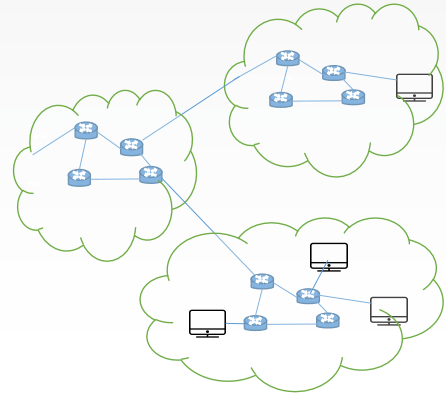
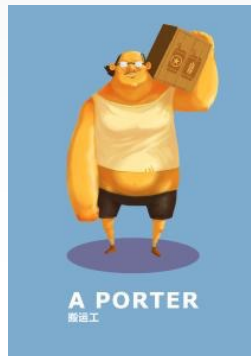
结点：主机、路由器

链路：网络中两个结点之间的**物理通道**，链路的传输介质主要有双绞线、光纤和微波。分为有线链路、无线链路。

数据链路：网络中两个结点之间的**逻辑通道**，把实现控制数据传输**协议**的硬件和软件加到链路上就构成数据链路。

帧：链路层的协议数据单元，封装网络层数据报。

数据链路层负责通过一条链路从一个结点向另一个物理链路直接相连的相邻结点传送数据报。



王道考研/CSKAOYAN.COM

数据链路层功能概述

数据链路层在物理层提供服务的基础上**向网络层提供服务**，其最基本的服务是将源自网络层来的数据**可靠**地传输到相邻节点的目标网络层。其主要作用是**加强物理层传输原始比特流的功能**，将物理层提供的可能出错的物理连接改造成为**逻辑上无差错的数据链路**，使之对网络层表现为一条无差错的链路。



王道考研/CSKAOYAN.COM

数据链路层功能概述

数据链路层在物理层提供服务的基础上**向网络层提供服务**，其最基本的服务是将源自网络层来的数据**可靠**地传输到相邻节点的目标机网络层。其主要作用是**加强物理层传输原始比特流的功能**，将物理层提供的可能出错的物理连接改造成为**逻辑上无差错的数据链路**，使之对网络层表现为一条无差错的链路。

功能一：为网络层提供服务。**无确认无连接服务**，**有确认无连接服务**，**有确认面向连接服务**。有连接一定有确认！

功能二：链路管理，即连接的建立、维持、释放（用于面向连接的服务）。

功能三：组帧。

功能四：流量控制。



限制发送方哦~

功能五：差错控制（帧错/位错）。

王道考研/CSKAQYAN.COM

本节内容

封装成帧
&
透明传输

王道考研/CSKAQYAN.COM

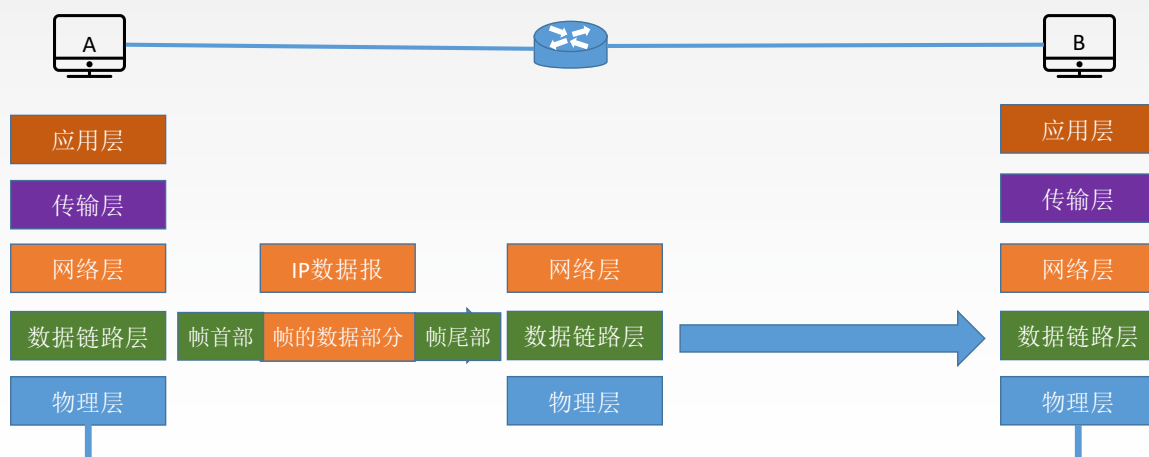
数据链路层功能概述

数据链路层在物理层提供服务的基础上**向网络层提供服务**，其最基本的服务是将源自网络层来的数据**可靠**地传输到相邻节点的目标机网络层。其主要作用是**加强物理层传输原始比特流的功能**，将物理层提供的可能出错的物理连接改造成为**逻辑上无差错的数据链路**，使之对网络层表现为一条无差错的链路。



王道考研/CSKAQYAN.COM

封装成帧



王道考研/CSKAQYAN.COM

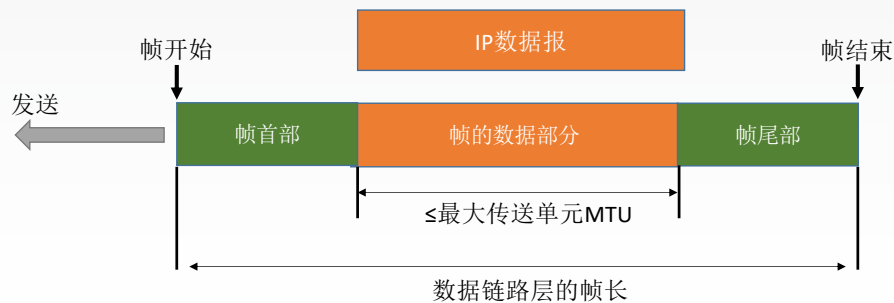
封装成帧

封装成帧就是在一段数据的前后部分添加首部和尾部，这样就构成了一个帧。接收端在收到物理层上交的比特流后，就能根据首部和尾部的标记，从收到的比特流中识别帧的开始和结束。

首部和尾部包含许多的控制信息，他们的重要作用：**帧定界**（确定帧的界限）。

帧同步：接收方应当能从接收到的二进制比特流中区分出帧的起始和终止。

组帧的四种方法：1.字符计数法，2.字符（节）填充法，3.零比特填充法，4.违规编码法。



王道考研/CSKAQYAN.COM

透明传输

透明传输是指不管所传数据是什么样的比特组合，都应当能够在链路上传送。因此，链路层就“看不见”有什么妨碍数据传输的东西。

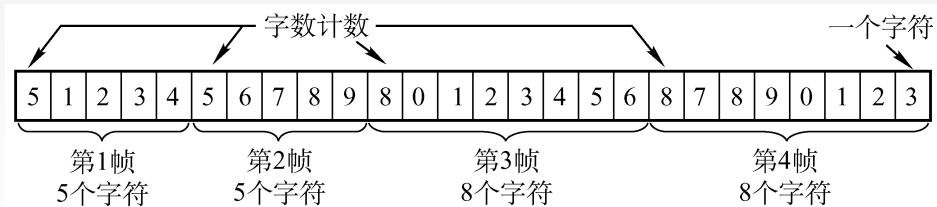
当所传数据中的比特组合恰巧与某一个控制信息完全一样时，就必须采取适当的措施，使收方不会将这样的数据误认为是某种控制信息。这样才能保证数据链路层的传输是透明的。



王道考研/CSKAQYAN.COM

1. 字符计数法

帧首部使用一个计数字段（第一个**字节**，八位）来标明帧内字符数。



痛点：鸡蛋装在一个篮子里了。

王道考研/CSKAOYAN.COM

2. 字符填充法

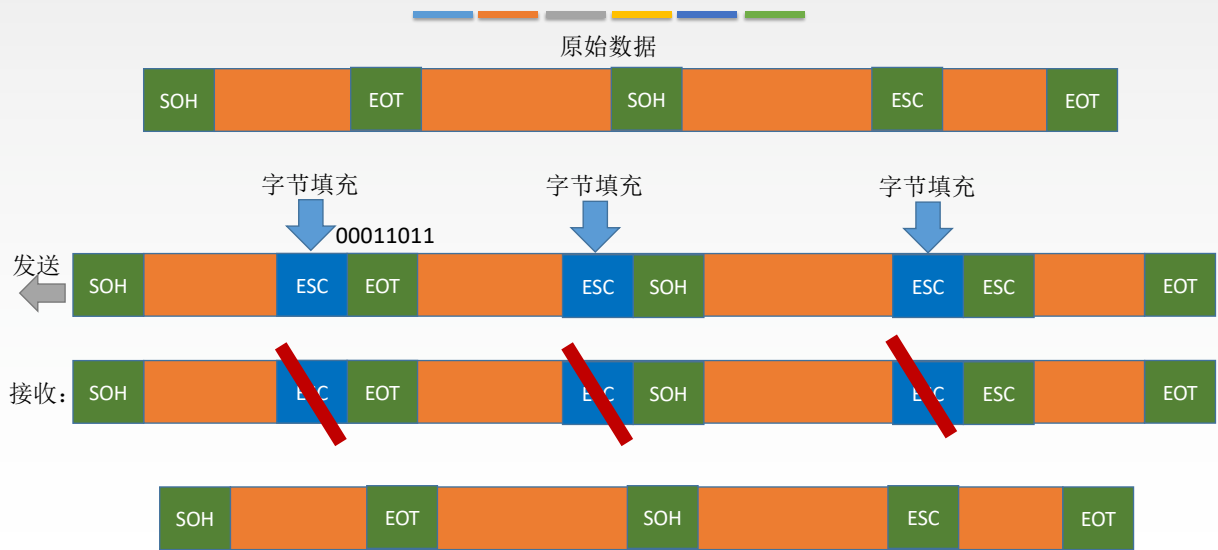


当传送的帧是由文本文件组成时（文本文件的字符都是从键盘上输入的，都是ASCII码）。不管从键盘上输入什么字符都可以放在帧里传过去，即**透明传输**。

当传送的帧是由非ASCII码的文本文件组成时（二进制代码的程序或图像等）。就要**采用字符填充方法实现透明传输**。

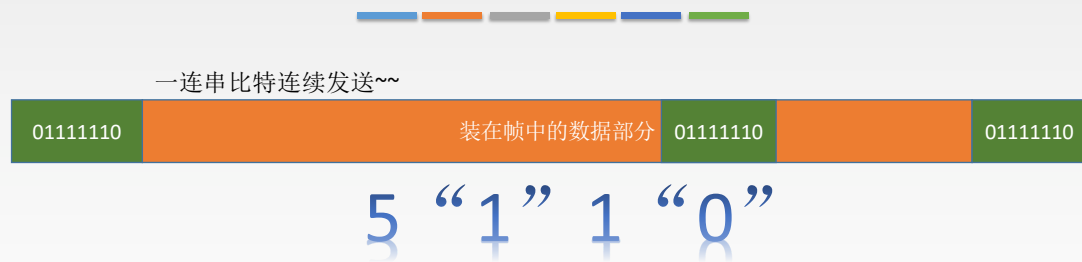
王道考研/CSKAOYAN.COM

2. 字符填充法



王道考研/CSKAQYAN.COM

3. 零比特填充法



操作：1.在发送端，扫描整个信息字段，只要连续5个1，就立即填入1个0。

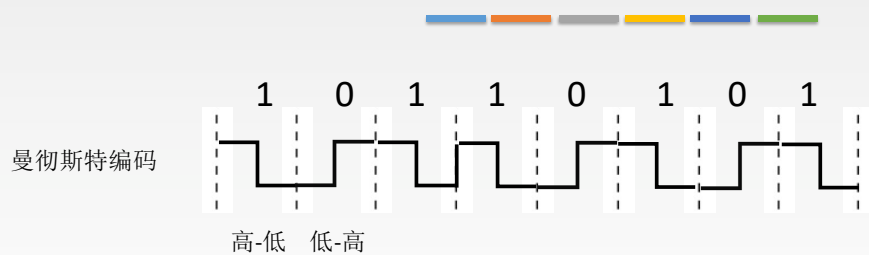
2.在接收端收到一个帧时，先找到标志字段确定边界，再用硬件对比特流进行扫描。发现连续5个1时，就把后面的0删除。

原始数据
0110111111110111110010
011011111101110111110010 填充
011011111101110111110010 删除
0110111111110111110010

保证了透明传输：在传送的比特流中可以传送任意比特组合，而不会引起对帧边界的判断错误。

王道考研/CSKAQYAN.COM

4.违规编码法



可以用“**高-高**”，“**低-低**”来定界帧的起始和终止。

由于字节计数法中Count字段的脆弱性（其值若有差错将导致灾难性后果）及字符填充实现上的复杂性和不兼容性，目前较普遍使用的帧同步法是**比特填充**和**违规编码法**。

王道考研/CSKAQYAN.COM

本节内容

差错控制
(检错编码)

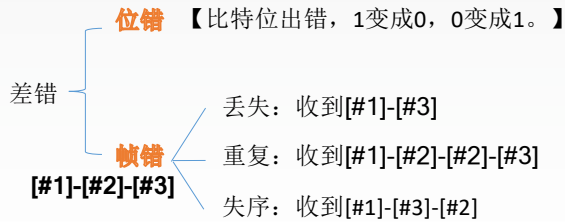
王道考研/CSKAQYAN.COM

差错从何而来？

概括来说，传输中的差错都是由于噪声引起的。

全局性 1.由于线路本身电气特性所产生的**随机噪声**(热噪声)，是信道固有的，随机存在的。
解决办法：提高信噪比来减少或避免干扰。(对传感器下手)

局部性 2.外界特定的短暂原因所造成的**冲击噪声**，是产生差错的主要原因。
解决办法：通常利用编码技术来解决。



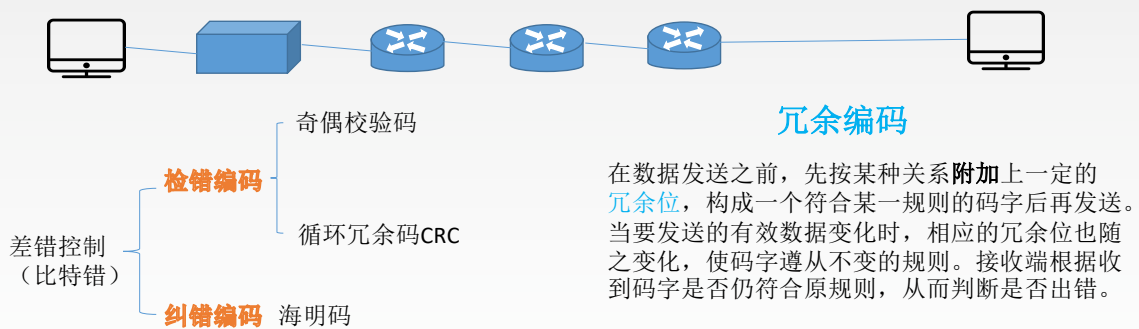
链路层为网络层提供服务：**无确认无连接服务**，**有确认无连接服务**，**有确认面向连接服务**。

通信质量好
有线传输链路

通信质量差的无线传输链路

王道考研/CSKAQYAN.COM

数据链路层的差错控制



编码 VS 编码

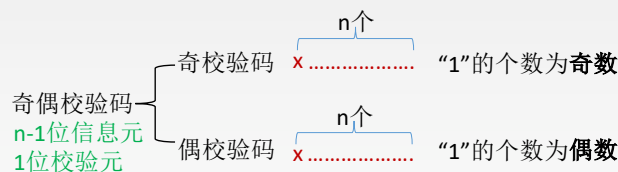
数据链路层编码和物理层的数据编码与调制**不同**。物理层编码针对的是**单个比特**，解决传输过程中比特的同步等问题，如曼彻斯特编码。而数据链路层的编码针对的是一组**比特**，它通过冗余码的技术实现一组二进制比特串在传输过程是否出现了差错。



偶数块肉！

王道考研/CSKAQYAN.COM

检错编码——奇偶校验码



如果一个字符S的ASCII编码从低到高依次为1100101, 采用奇校验, 在下述收到的传输后字符中, 哪种错误不能检测?

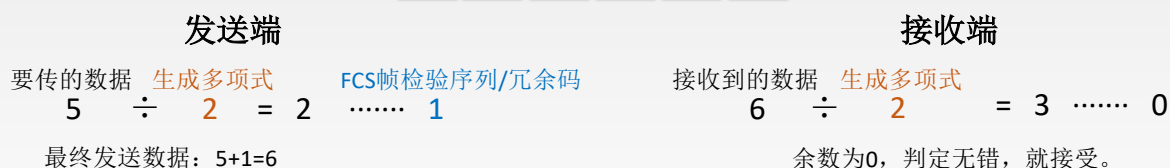
- A. 11000011 B. 11001010 C. 11001100 D. 11010011

奇偶校验码特点:

只能检查出奇数个比特错误, 检错能力为50%。

王道考研/CSKAQYAN.COM

检错编码——CRC循环冗余码



1. 准备待传有效数据



2. 每个组都加上冗余码构成帧再发送



FCS帧检验序列计算方式:



3. 接收方检验



模二A.K.A异或(同0异1)

王道考研/CSKAQYAN.COM

检错编码——CRC循环冗余码

发送端

要传的数据 生成多项式 FCS帧检验序列/冗余码
5 ÷ 2 = 2 1

最终发送数据: 5+1=6

接收端

接收到的数据 生成多项式
6 ÷ 2 = 3 0

余数为0, 判定无错, 就接受。

例: 要发送的数据是1101 0110 11, 采用CRC校验, 生成多项式是10011, 那么最终发送的数据应该是?

最终发送的数据:
要发送的数据+帧检验序列FCS

计算冗余码:

- (1) 加0 假设生成多项式G(x)的阶为r, 则加r个0。
- (2) 模2除法 数据加0后除以多项式, 余数为冗余码/FCS/CRC检验码的比特序列。

10011表示成多项式为

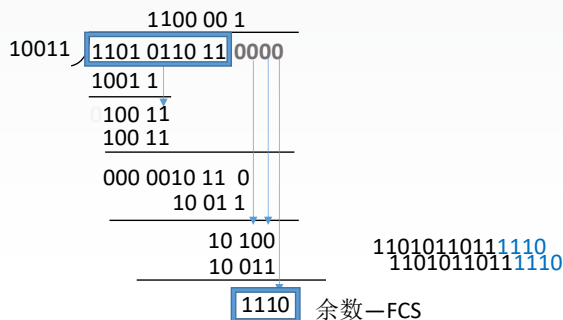
$$X^4 + X^1 + X^0$$

$$= X^4 + X^1 + 1$$

阶为4

异或: 同0异1

TIPS: 多项式N位, 阶为N-1。



王道考研/CSKAQYAN.COM

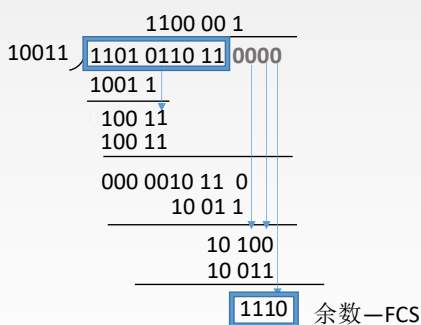
检错编码——CRC循环冗余码

接收端检错过程

把收到的每一个帧都除以同样的除数, 然后检查得到的余数R。

1. 余数为0, 判定这个帧没有差错, 接受。
2. 余数不为0, 判定这个帧有差错 (无法确定到位), 丢弃。

FCS的生成以及接收端CRC检验都是由硬件实现, 处理很迅速, 因此不会延误数据的传输。



最终发送的数据: 11010110111110



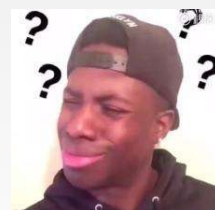
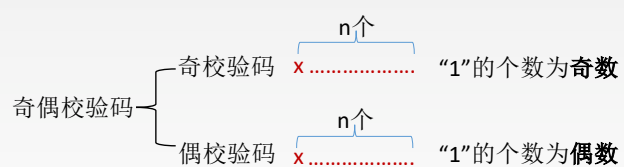
王道考研/CSKAQYAN.COM

本节内容

差错控制 (纠错编码)

王道考研/CSKAOYAN.COM

纠错编码——海明码



✓ 发现错误 ✓ 找到位置 ✓ 纠正错误

工作流程:



王道考研/CSKAOYAN.COM

海明距离

两个合法编码(码字)的对应比特取值不同的比特数称为这两个码字的海明距离(码距)，一个有效编码集中,任意两个合法编码(码字)的海明距离的最小值称为该编码集的海明距离(码距)。

000
001
010
011
100
101
110
111

该编码系统中的码距为1

传输中出错了咋整?

0000
1001
1010
0011
1100
0101
0110
1111

该编码系统中的码距为2

传输中出错了咋整?

可检测出1位错
但不可被纠正

如果码距为3呢?

王道考研/CSKAQYAN.COM

1.确定校验码位数r

数据/信息有m位，冗余码/校验码有r位

校验码一共有 2^r 种取值

$$2^r \geq m+r+1$$

海明不等式

要发送的数据：D=1100

数据的位数 $m=4$ ，
满足不等式的最小 r 为3，
也就是D=1100的海明码应该有 $4+3=7$ 位，
其中原数据4位，校验码3位。

王道考研/CSKAQYAN.COM

2.确定校验码和数据的位置

D=1100

校验码放在序号为 2^n 的位置，数据按序填上

序号	7	6	5	4	3	2	1
值	1	1	0	x_4	0	x_2	x_1

王道考研/CSKAOYAN.COM

3.求出校验码的值

原始数据D=1100

二进制	111	110	101	100	011	010	001
序号	7	6	5	4	3	2	1
值	1	1	0	x_4	0	x_2	x_1

4号校验码负责4, 5, 6, 7的校验

2号校验码负责2, 3, 6, 7的校验

1号校验码负责1, 3, 5, 7的校验

采用偶校验

$$x_4 = 0$$

$$x_2 = 0$$

$$x_1 = 1$$

完整海明码：

序号	7	6	5	4	3	2	1
值	1	1	0	0	0	0	1

王道考研/CSKAOYAN.COM

4.检错并纠错



二进制	111	110	101	100	011	010	001
序号	7	6	5	4	3	2	1
值	1	1	0	0	0	0	1



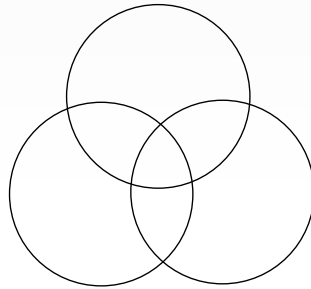
若接收方收到的数据为**1110001**，检错类似奇偶校验

4号校验码负责4, 5, 6, 7的校验 → 0, 1, 1, 1 ☒

2号校验码负责2, 3, 6, 7的校验 → 0, 0, 1, 1 ☒

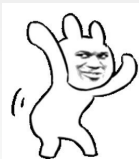
1号校验码负责1, 3, 5, 7的校验 → 1, 0, 1, 1 ☒

纠错方法一：
找到不满足奇/偶校验的分组取交集，并与符合校验的分组取差集。



王道考研/CSKAOYAN.COM

4.检错并纠错



二进制	111	110	101	100	011	010	001
序号	7	6	5	4	3	2	1
值	1	1	0	0	0	0	1



若接收方收到的数据为**1110001**，检错类似奇偶校验

4号校验码负责4, 5, 6, 7的校验 → 0, 1, 1, 1 ☒

2号校验码负责2, 3, 6, 7的校验 → 0, 0, 1, 1 ☒

1号校验码负责1, 3, 5, 7的校验 → 1, 0, 1, 1 ☒

纠错方法二：

X4 0, 1, 1, 1
X2 0, 0, 1, 1
X1 1, 0, 1, 1

满足偶校验
Or异或为0

X4 = 1
X2 = 0
X1 = 1

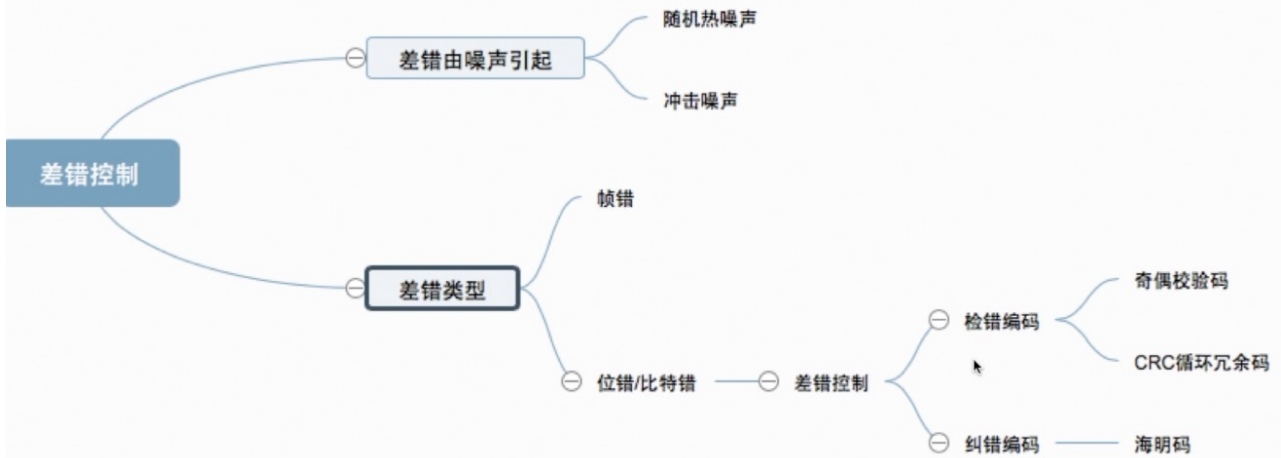
X4 X2 X1
1 0 1

第五位错了



王道考研/CSKAOYAN.COM

脑图时刻



本节内容

流量控制与可靠传输机制
(第一话)

数据链路层的流量控制

较高的发送速度和较低的接收能力的 mismatch，会造成传输出错，因此流量控制也是数据链路层的一项重要工作。

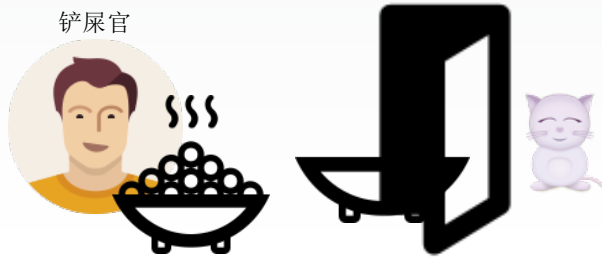
数据链路层的流量控制是点对点的，而传输层的流量控制是端到端的。

数据链路层流量控制手段：接收方收不下就不回复确认。

传输层流量控制手段：接收端给发送端一个窗口公告。



发送方！！
你慢点！！

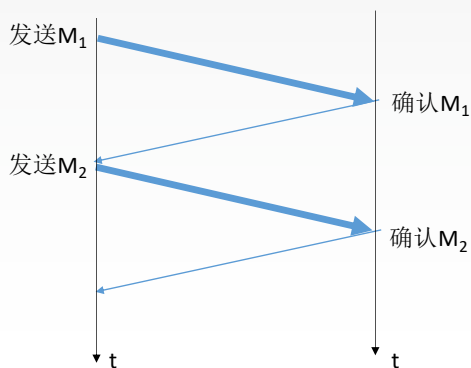


王道考研/CSKAOYAN.COM

流量控制的方法

停止-等待协议

每发送完一个帧就停止发送，等待对方的确认，在收到确认后再发送下一个帧。



滑动窗口协议

后退N帧协议 (GBN)

选择重传协议 (SR)



王道考研/CSKAOYAN.COM

流量控制的方法

停止-等待协议

发送窗口大小=1，接收窗口大小=1；

后退N帧协议（GBN）

发送窗口大小>1，接收窗口大小=1；

选择重传协议（SR）

发送窗口大小>1，接收窗口大小>1；

王道考研/CSKAOYAN.COM

可靠传输、滑动窗口、流量控制

可靠传输：发送端发啥，接收端收啥。

流量控制：控制发送速率，使接收方有足够的缓冲空间来接收每一个帧。

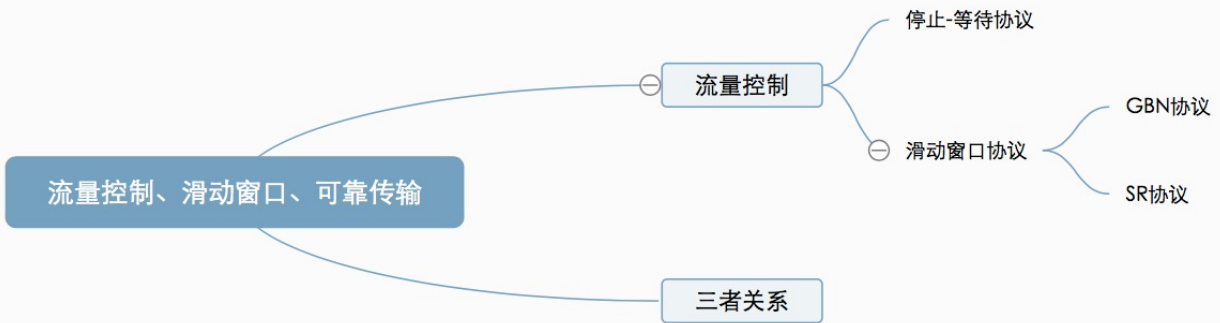
滑动窗口解决 {

- 流量控制（收不下就不给确认，想发也发不了）
- 可靠传输（发送方自动重传）



王道考研/CSKAOYAN.COM

脑图时刻



王道考研/CSKAOYAN.COM

本节内容

停止-等待协议

王道考研/CSKAOYAN.COM

停止-等待协议究竟是哪一层的？



王道考研/CSKAOYAN.COM

停止-等待协议

1. 为什么要有停止-等待协议？

除了比特出差错，底层信道还会出现丢包问题。
为了实现流量控制。

丢包：物理线路故障、设备故障、病毒攻击、路由信息错误等原因，会导致数据包的丢失。

2. 研究停等协议的前提？

虽然现在常用全双工通信方式，但为了讨论问题方便，仅考虑一方发送数据（发送方），一方接收数据（接收方）。

因为是在讨论可靠传输的原理，所以并不考虑数据是在哪一个层次上传送的。

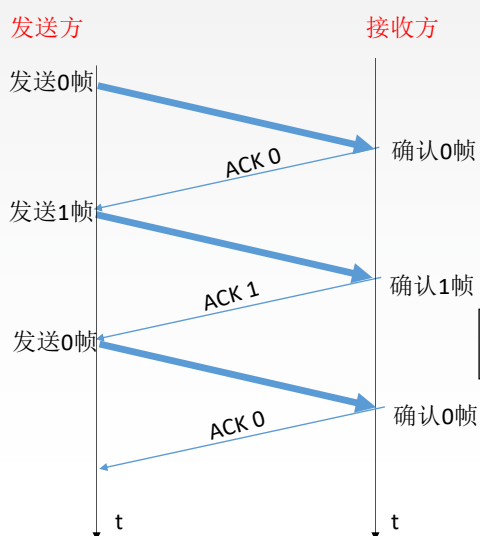
“停止-等待”就是每发送完一个分组就停止发送，等待对方确认，在收到确认后再发送下一个分组。

3. 停等协议有几种应用情况？

无差错情况&有差错情况

王道考研/CSKAOYAN.COM

停等协议——无差错情况

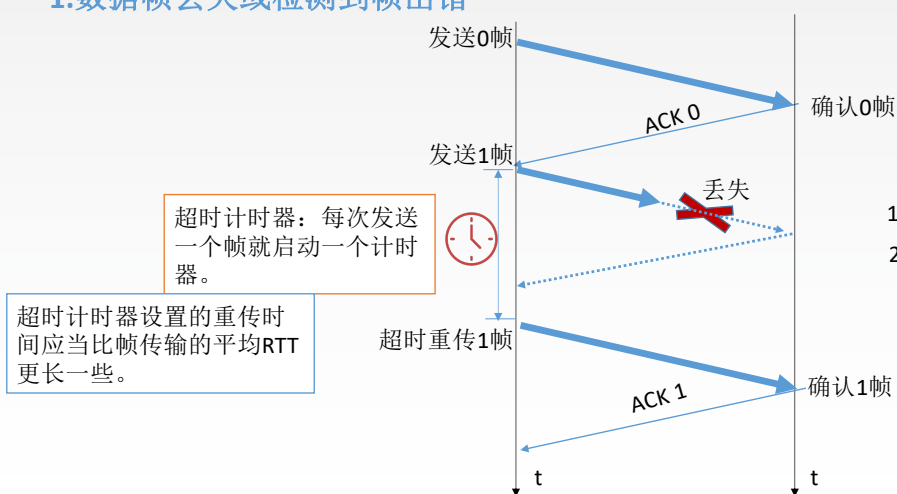


每发送1个数据帧就停止并等待，因此用1bit来编号就够。

王道考研/CSKAQYAN.COM

停等协议——有差错情况

1. 数据帧丢失或检测到帧出错



超时计时器：每次发送一个帧就启动一个计时器。

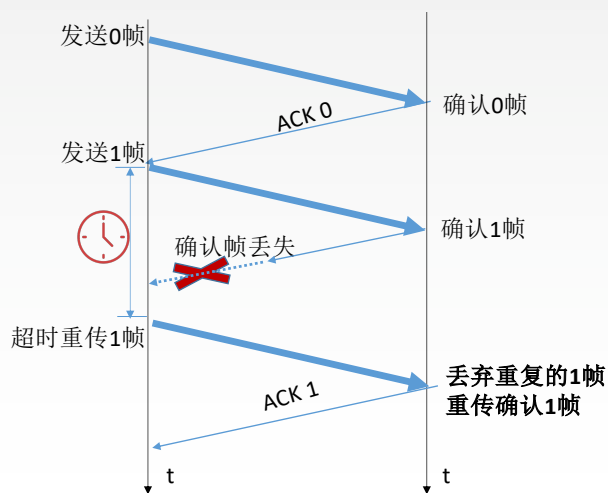
超时计时器设置的重传时间应当比帧传输的平均RTT更长一些。

- !
1. 发完一个帧后，必须保留它的副本。
 2. 数据帧和确认帧必须编号。

王道考研/CSKAQYAN.COM

停等协议——有差错情况

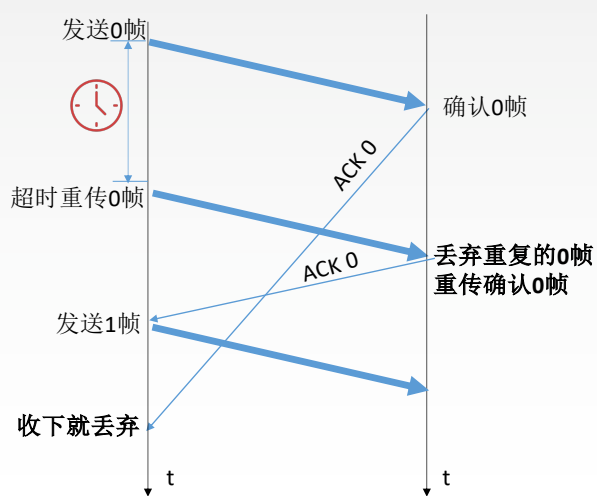
2.ACK丢失



王道考研/CSKAQYAN.COM

停等协议——有差错情况

3.ACK迟到



王道考研/CSKAQYAN.COM

停等协议性能分析

简单!

信道利用率太低!



$$\text{信道利用率 } U = \frac{T_D}{T_D + RTT + T_A}$$

王道考研/CSKAQYAN.COM

信道利用率

发送方在一个发送周期内，有效地发送数据所需要的时间占整个发送周期的比率。

$$\text{信道利用率} = (L/C)/T$$

T 内发送 L 比特数据
发送方数据传输率
发送周期
从开始发送数据，到收到第一个确认帧为止

信道吞吐率=信道利用率*发送方的发送速率

例题：一个信道的数据传输率为4kb/s，单向传播时延为30ms，如果使停止-等待协议的信道最大利用率达到80%，要求的数据帧长度至少为（ ）。

$$\begin{aligned} 80\% &= \frac{L/4}{L/4 + 2 \times 30\text{ms}} \\ &= \frac{L}{L + 2 \times 30\text{ms} \times 4\text{kb/s}} \\ L &= 960\text{bit} \end{aligned}$$

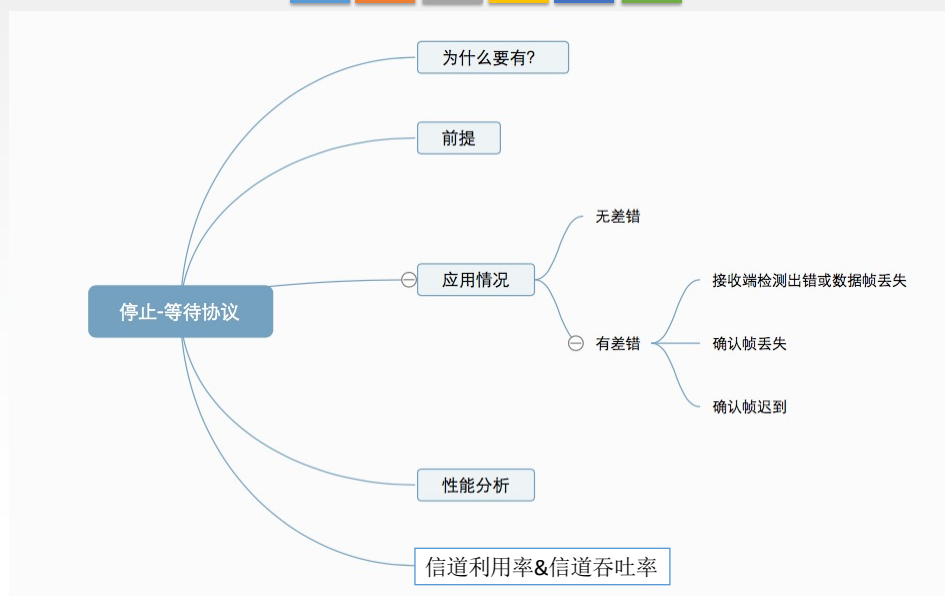
王道考研/CSKAQYAN.COM

信道利用率



王道考研/CSKAOYAN.COM

脑图时刻



王道考研/CSKAOYAN.COM

本节内容

后退N帧协议 (GBN)

王道考研/CSKAOYAN.COM

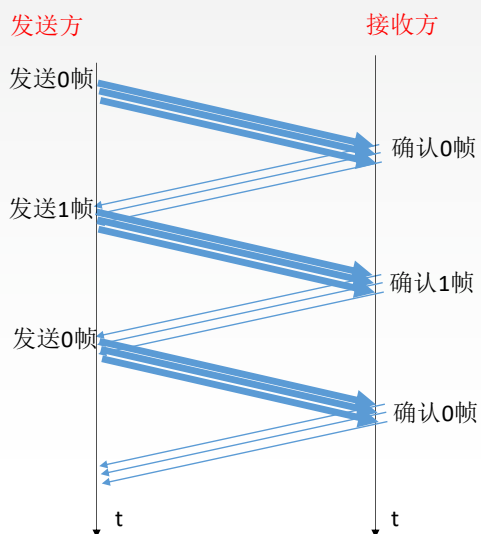
停等协议的弊端

流水线技术

1. 必须增加序号范围。
2. 发送方需要缓存多个分组。

后退N帧协议 (GBN)

选择重传协议 (SR)



太闲了。。

王道考研/CSKAOYAN.COM

后退N帧协议中的滑动窗口



王道考研/CSKAQYAN.COM

GBN发送方必须响应的三件事

1.上层的调用

上层要发送数据时，发送方先检查发送窗口是否已满，如果**未**满，则产生一个帧并将其发送；如果**窗**口已**满**，发送方只需将数据返回给上层，暗示上层窗口已满。上层等一会再发送。（实际实现中，发送方可以缓存这些数据，窗口不满时再发送帧）。

2.收到了一个ACK

GBN协议中，对n号帧的确认采用**累积确认**的方式，标明接收方已经收到n号帧和它之前的全部帧。

3.超时事件

协议的名字为后退N帧/回退N帧，来源于出现丢失和时延过长帧时发送方的行为。就像在停等协议中一样，定时器将再次用于恢复数据帧或确认帧的丢失。如果出现超时，发送方重传所有已发送但未被确认的帧。

王道考研/CSKAQYAN.COM

GBN接收方要做的事

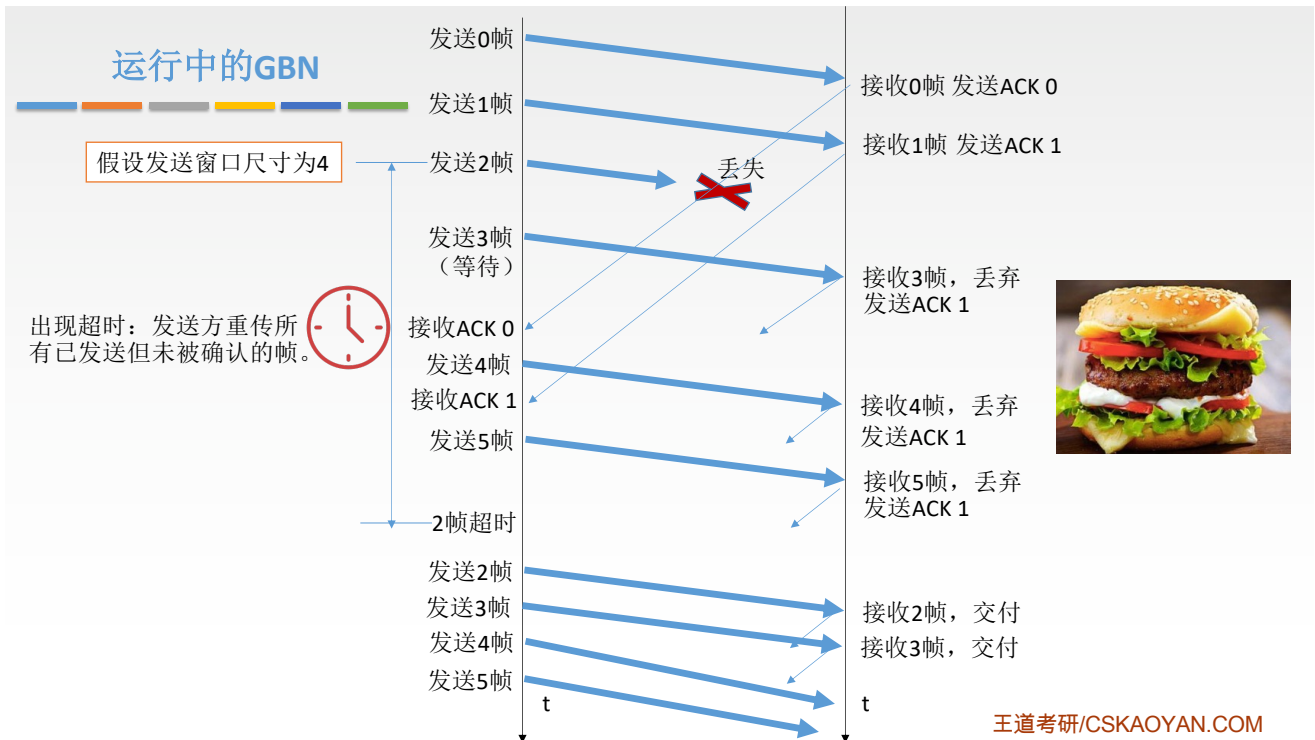


如果正确收到 n 号帧，并且按序，那么接收方为 n 帧发送一个ACK，并将该帧中的数据部分交付给上层。



其余情况都丢弃帧，并为最近按序接收的帧重新发送ACK。接收方无需缓存任何失序帧，只需要维护一个信息：`expectedseqnum`（下一个按序接收的帧序号）。

王道考研/CSKAQYAN.COM



滑动窗口长度

窗口长度可以无限吗？



若采用 n 个比特对帧编号，那么发送窗口的尺寸 W_T 应满足： $1 \leq W_T \leq 2^n - 1$ 。因为发送窗口尺寸过大，就会使得接收方无法区别新帧和旧帧。

王道考研/CSKAQYAN.COM

GBN协议重点总结

1. 累积确认（偶尔捎带确认）
2. 接收方只按顺序接收帧，不按序无情丢弃
3. 确认序列号最大的、按序到达的帧
4. 发送窗口最大为 $2^n - 1$ ，接收窗口大小为 1

王道考研/CSKAQYAN.COM

习题1

数据链路层采用了后退N帧（GBN）协议，发送方已经发送了编号为0~7的帧。当计时器超时时，若发送方只收到0、2、3号帧的确认，则发送方需要重发的帧数是（ ）。

- A . 2 B . 3 C . 4 D . 5

重新发送4、5、6、7帧

王道考研/CSKAOYAN.COM

习题2

主机甲与主机乙之间使用后退N帧协议（GBN）传输数据，甲的发送窗口尺寸为1000，数据帧长为1000字节，信道带宽为100Mb/s，乙每收到一个数据帧立即利用一个短帧（忽略其传输延迟）进行确认，若甲、乙之间的单向传播时延是50ms，则甲可以达到的最大平均数据传输率约为（ ）。

- A . 10Mb/s B . 20Mb/s C . 80Mb/s D . 100Mb/s

王道考研/CSKAOYAN.COM

GBN协议性能分析



因连续发送数据帧而提高了信道利用率

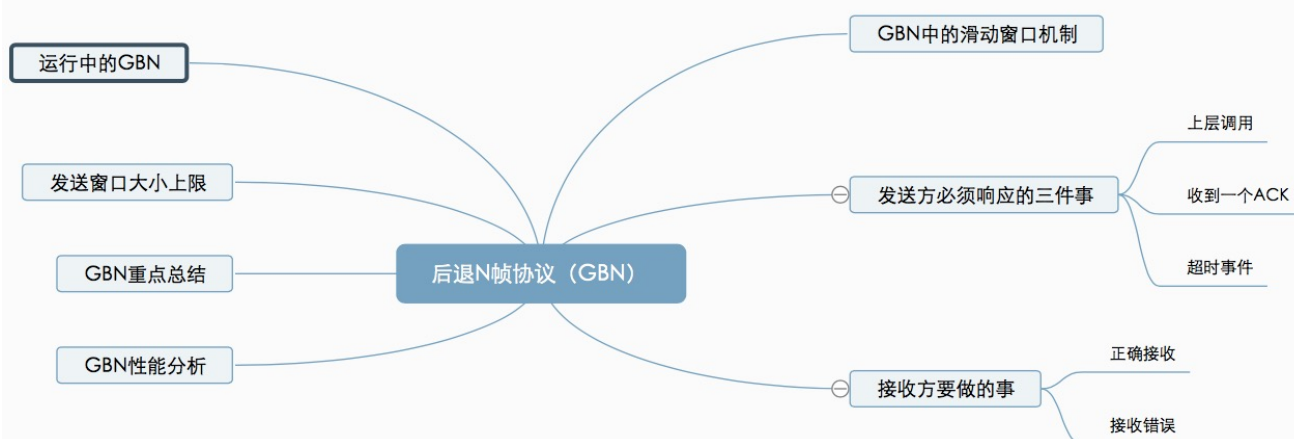


在重传时必须把原来已经正确传送的数据帧重传，是传送效率降低。

选择重传协议

王道考研/CSKAOYAN.COM

脑图时刻



王道考研/CSKAOYAN.COM

本节内容

选择重传协议 (Selective Repeat)

王道考研/CSKAOYAN.COM

GBN协议的弊端

累积确认 → 批量重传

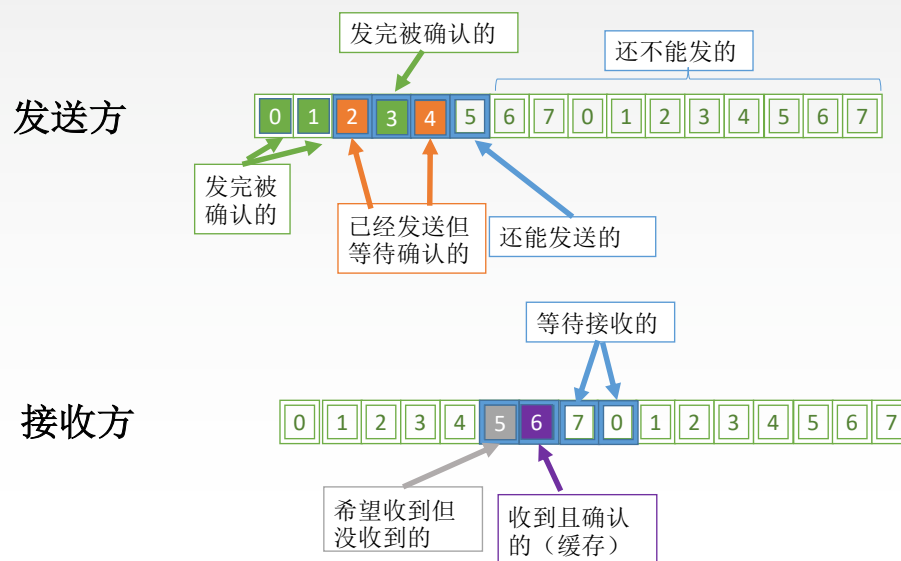


可不可以只重传出错的帧？

解决办法：设置单个确认，同时加大接收窗口，设置接收缓存，缓存乱序到达的帧。

王道考研/CSKAOYAN.COM

选择重传协议中的滑动窗口



王道考研/CSKAQYAN.COM

SR发送方必须响应的三件事

1. 上层的调用

从上层收到数据后，SR发送方检查下一个可用于该帧的序号，如果序号位于发送窗口内，则发送数据帧；否则就像GBN一样，要么将数据缓存，要么返回给上层之后再传输。

2. 收到了一个ACK

如果收到ACK，加入该帧序号在窗口内，则SR发送方将那个被确认的帧标记为已接收。如果该帧序号是窗口的下界（最左边第一个窗口对应的序号），则窗口向前移动到具有最小序号的未确认帧处。如果窗口移动了并且有序号在窗口内的未发送帧，则发送这些帧。



3. 超时事件

每个帧都有自己的定时器，一个超时事件发生后只重传一个帧。

王道考研/CSKAQYAN.COM



5号帧	7号帧 缓存起来
-----	-------------



王道考研/CSKAOYAN.COM

假设发送窗口和接收窗口尺寸都为 4

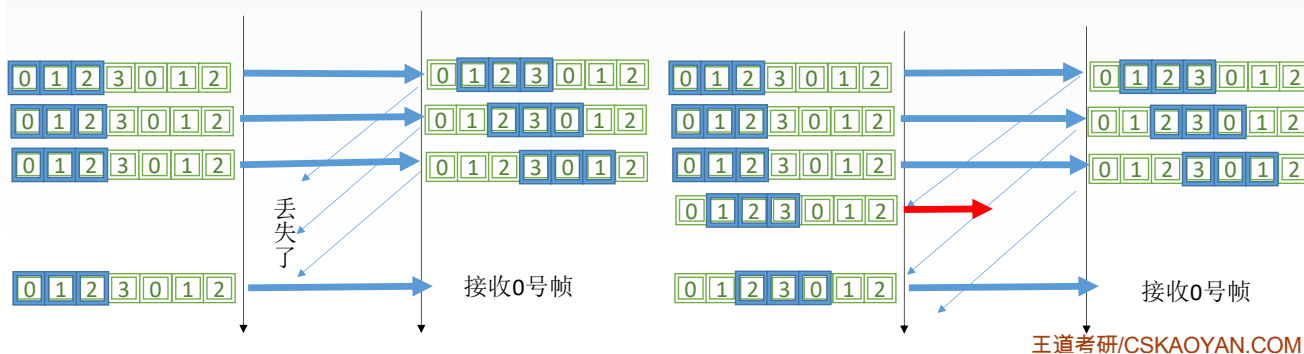


滑动窗口长度

窗口长度可以无限吗？

发送窗口最好等于接收窗口。（大了会溢出，小了没意义）

$$W_{Tmax}=W_{Rmax}=2^{(n-1)}$$



SR协议重点总结

- 1.对数据帧逐一确认，收一个确认一个
- 2.只重传出错帧
- 3.接收方有缓存

4. $W_{Tmax}=W_{Rmax}=2^{n-1}$

习题1

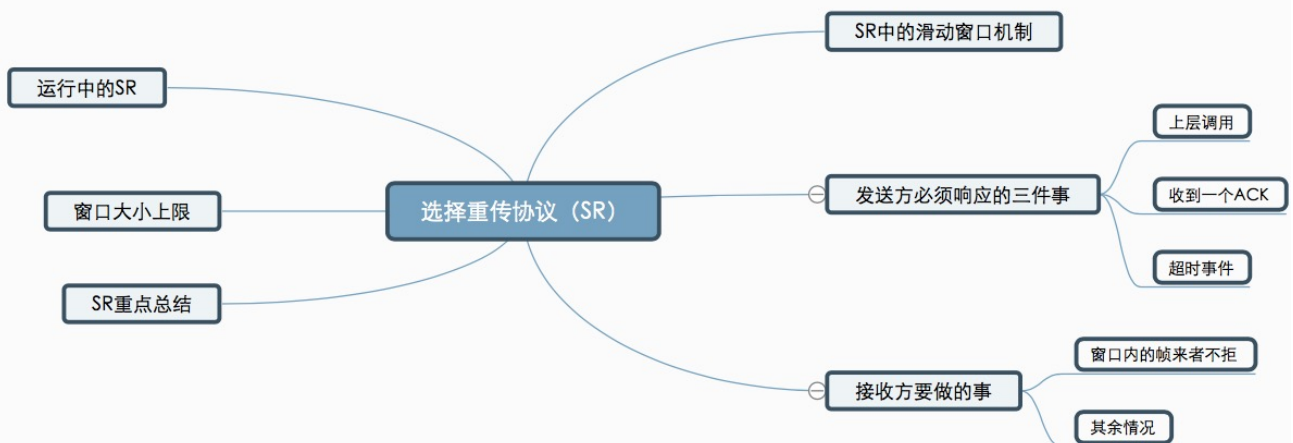
数据链路层采用了选择重传（SR）协议，发送方已经发送了编号为0~3的帧。现已收到1号帧的确认，而0、2号帧依次超时，则发送方需要重传的帧数是（ ）。

A . 2 B . 3 C . 4 D . 5

重新发送0、2号帧

王道考研/CSKAQYAN.COM

脑图时刻



王道考研/CSKAQYAN.COM