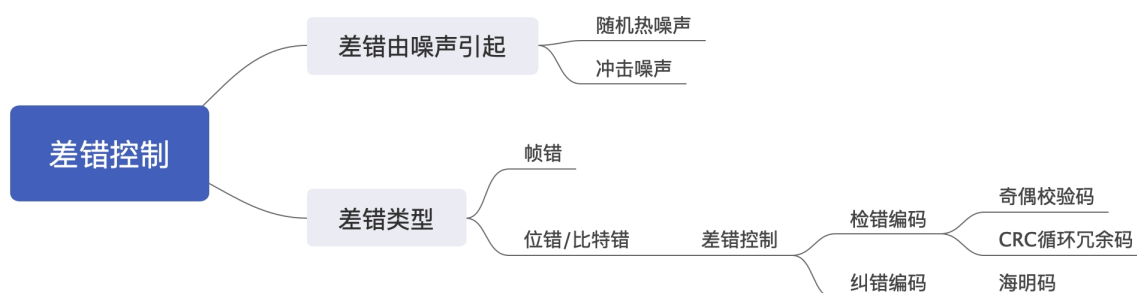


### 第三章 数据链路层 3.3 差错控制



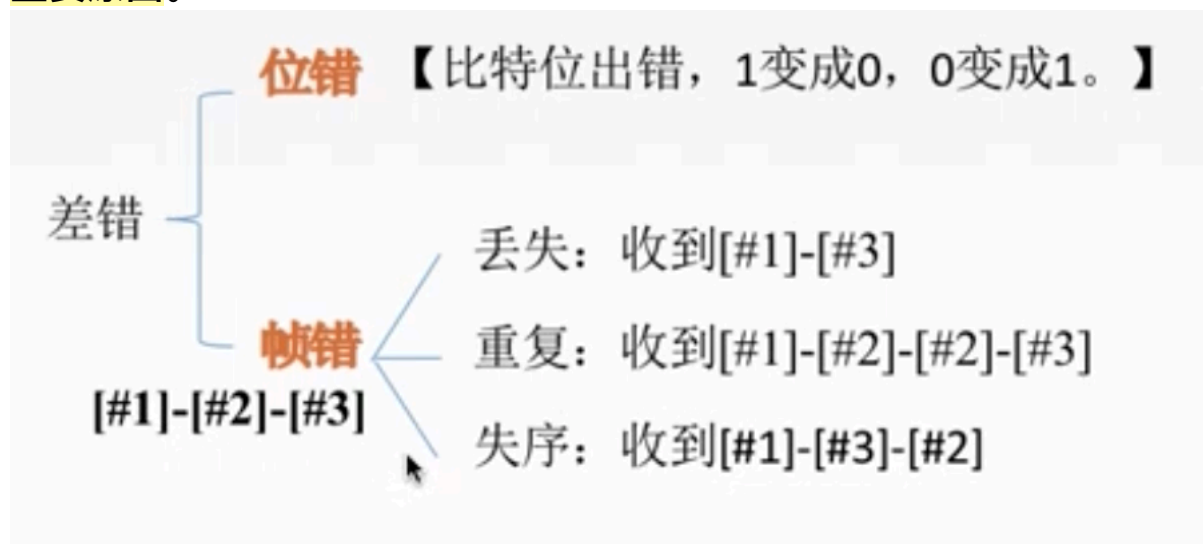
概括的说，传输中的差错都是由噪声引起的。

噪声分为两大类：

- 信道固有的，持续存在的随机热噪声。
- 外界特定的短暂原因所造成的冲击噪声。

随机热噪声：可以通过提高信噪比来减少或避免干扰；

冲击噪声：不可能靠提高信号幅度来避免干扰造成差错，是产生差错的重要原因。



编码技术进行差错控制，主要有两类：

- 自动重传请求 (ARQ)
- 前向纠错 (FEC)

在ARQ方式中，接收端检测出差错时，就设法通知发送端重发，直到接收到正确的码字为止。

在FEC方式中，接收端不但能发现差错，而且能确定二进制数码的错误位置，从而加以纠正。

因此，差错控制又可分为检错编码和纠错编码

### 3.3.1 检错编码

检错编码都采用冗余编码技术，其核心思想是在有效数据（信息位）被发送前，先按某种关系附加一定的冗余位，构成一个符合某一规则的码字后再发送，

当要发送的有效数据变化时，相应的冗余位也随之变化，使得码字遵从不变的规则。

接收端根据收到的码字是否仍符合原规则来判断是否出错。

常见的检错编码有奇偶校验码和循环冗余码。

#### 1、奇偶校验码：

奇偶校验码是奇校验码和偶校验码的统称。

它由 $n-1$ 位信息元和1位校验元组成，

如果是奇校验码，那么在附加一个校验元后，码长为 $n$ 的码字中“1”的个数为奇数；

如果是偶校验码，那么在附加一个校验元以后，码长为 $n$ 的码字中“1”的个数为偶数。

它又分为垂直奇偶校验、水平奇偶校验和水平垂直奇偶校验。

奇偶校验码只能检查出奇数个比特错误，检错能力为50%

#### 2、循环冗余码：

循环冗余码（CRC）又称多项式码，任何一个由二进制数位串组成的代码都可以与一个只含有0和1两个系数的多项式建立一一

### 对应关系。

一个 $k$ 位帧可以视为从 $X^{k-1}$ 到 $X^0$ 的 $k$ 次多项式的**系数序列**，这个多项式的阶数为 $k-1$ ，**高位是 $X^{k-1}$ 项的系数**，**下一位是 $X^{k-2}$ 的系数**，以此类推。

例如：1110011有7位，表示成多项式是 $X^6+X^5+X^4+X+1$ ，而多项式 $X^5+X^4+X^2+X$ 对应的位串是110110，其运算过程如下图：

110101 ←  $Q$ 商

除数  $P \rightarrow 1101 \mid 101001000 \leftarrow 2^n M$  被除数

1101 ↓  
1110  
1101 ↓  
0111  
0000 ↓  
1110  
1101 ↓  
0110  
0000 ↓  
1100  
1101 ↓  
001 ←  $R$ (余数), 作为FCS

图 3.6 循环冗余码的运算过程

给定一个  $m$  bit 的帧或报文，发送器生成一个  $r$  bit 的序列，称为帧检验序列 (FCS)。这样所形成的帧将有  $m+r$  比特组成。

发送方和接收方事先商定一个多项式  $G(x)$ （最高位和最低位必须为1），使这个带检验码的帧刚好能被预先确定的多项式  $G(x)$  整除。

接收方用相同的多项式去除收到的帧，如果无余数，那么认为无差错。

假设一个帧有  $m$  位，其对应的多项式为  $M(x)$ ，则计算冗余码的步骤如下：

- (1) 加0。假设  $G(x)$  的阶为  $r$ ，在帧的低位端加上  $r$  个0。
- (2) 模2除。利用模2除法，用  $G(x)$  对应的数据串去除 (1) 中计算出的数据串，得到的余数即为冗余码（共  $r$  位，前面的0不可省略）。

多项式以2为模运算。按照模2运算规则，加法不进位，减法不借位，它刚好是异或操作。乘除法类似于二进制的运算，只是在做加减法时按模2规则进行。

冗余码的计算举例：设  $G(x) = 1101$ （即  $r=3$ ），待传送数据  $M=101001$ （即  $m=6$ ），经模2除法运算后的结果是：商  $Q=110111$ （这个商没什么用），余数  $R=001$ 。所以发送出去的数据为  $101001001$ （即  $2^5M + FCS$ ），共有  $m+r$  位。循环冗余码的运算过程如上面的图所示。

---

### 3.3.2 纠错编码

在数据通信的过程中，解决差错问题的一种方法就是：在每个要发送的数据块上附加足够的冗余信息，使接收方能够推导出发送方实际送出的应该是什么样的比特串。

最常见的纠错编码是海明码。它能发现双比特错，但只能纠正单比特错。

**海明码编码过程**：海明编码将码字内的位从左至右依次编号，第一位是1号，第二位是2号，...第n位是n号，编号为2的幂的位是校验位（1号位，2号位，4号位，8号位...），其余的位填入m位数据。

每个校验位的取值应使得包含自身在内的一些位的集合服从规定的奇偶性（如偶性要求这些位的集合中1的个数是偶数）。

为了知道编号为k的数据位对哪些校验位有影响，将编号k改写成2的幂的和，如 $11=1+2+8$ ， $29=1+4+8+16$ 。

一个位只由扩展式中所示编号的位检测，如编号为11的位只由编号为1，2和8的校验位检测。

m个信息位插入r个校验位组成m+r位码字，它们必须满足的关系 $2^r \geq m+r+1$ 。

以典型的4位数据编码为例，海明码将加入3个校验码，从而实际传输7位码字：

数据位：1 2 3 4 5 6 7

代码：  $P_1$   $P_2$   $D_1$   $P_3$   $D_2$   $D_3$   $D_4$

说明：  $P_x$ 为校验码， $D_x$ 为数据码

注：4位数据编码若采用海明码作为纠错编码，需要插入3个校验码。

### 海明码编码原理：

以数据码1101为例讲述海明码的编码原理。

此时， $D_1=1$ ， $D_2=1$ ， $D_3=0$ ， $D_4=1$ ，对于数据位的编码，有 $1=1$ ， $2=2$ ， $3=1+2$ ， $4=4$ ， $5=1+4$ ， $6=2+4$ ， $7=1+2+4$ 。

于是P1对应数据1，3，5，7，令 $P_1 \oplus D_1 \oplus D_2 \oplus D_4 = 0$ ，（ $\oplus$ 表示异或符号），得 $P_1=1$ ；

P2对应的数据位为2，3，6，7，令 $P_2 \oplus D_1 \oplus D_3 \oplus D_4 = 0$ ，得 $P_2=0$ ；

P3对应的数据位是4，5，6，7，令 $P_3 \oplus D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 = 0$ ，得 $P_3=0$ 。

因此，海明编码的结果是1010101。

### 海明码纠错原理：

以上面得到的海明编码的结构为例：

接收方收到的正确码字应该为1010101，如果 $D_3$ 在传输途中因干扰而变成了1，那么接收方就收到了1010111。

检测时， $P_1 \oplus D_1 \oplus D_2 \oplus D_4 = 0$ ，第一位纠错代码为0，正确；

$P_2 \oplus D_1 \oplus D_3 \oplus D_4 = 1$ ，第二位纠错代码为1，错误；

$P_3 \oplus D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 = 1$ ，第三位纠错代码为1，有错误。

将三个纠错代码从高到低排列为二进制编码110，换算成十进制数就是6，也就是说第6位数据错了，而数据 $D_3$ 在海明编码后的位置正好是第6位，取反即可。