



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

立足航天，服务国防，面向国民经济主战场



# 计算机网络之探赜索隐

主讲人：李全龙

# 本讲主题

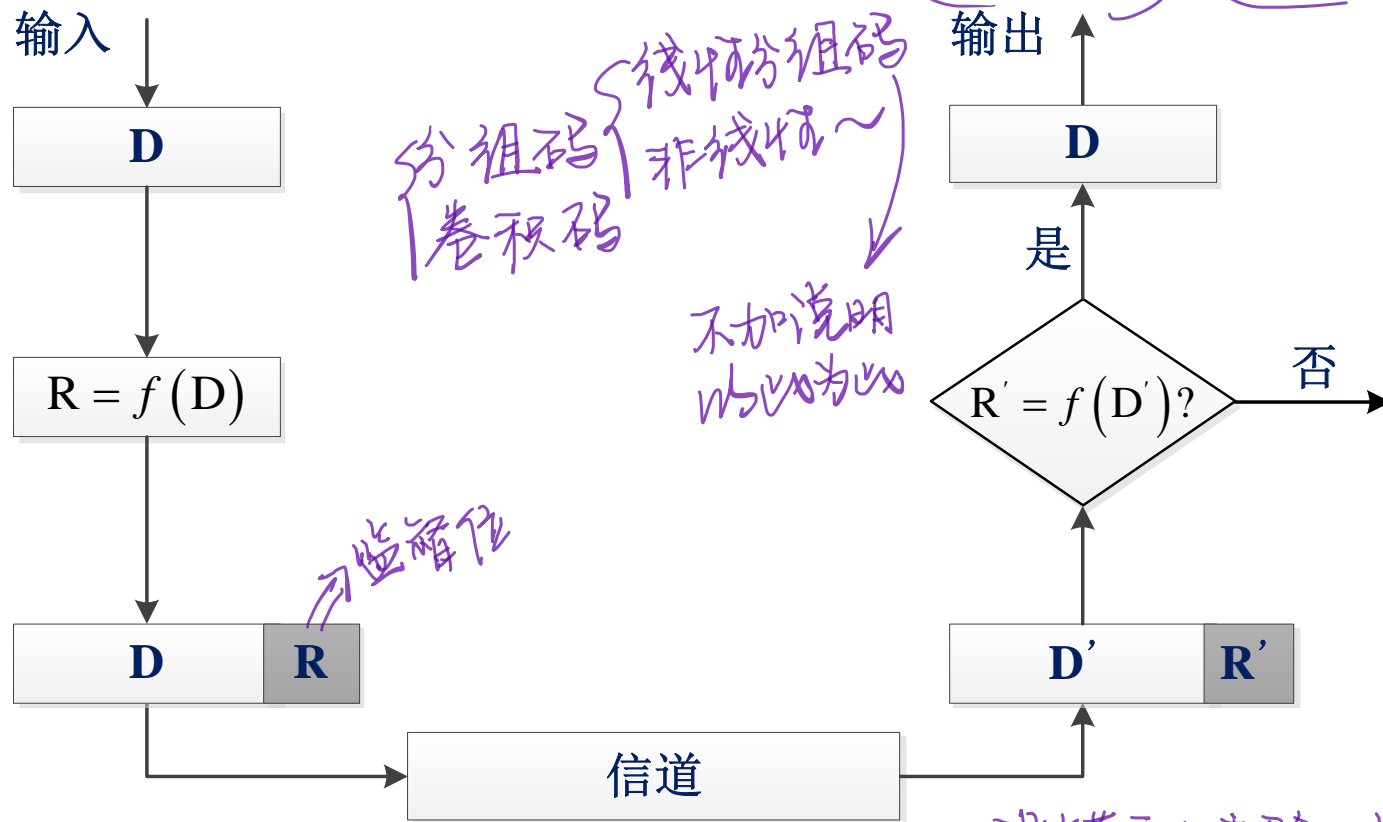
## 差错编码



# 差错检测：差错编码

差错编码基本原理：

$D \rightarrow DR$ ，其中R为差错检测与纠正比特（冗余比特）



差错编码不能保证100%可靠！

没错可以去除R  
还原信息

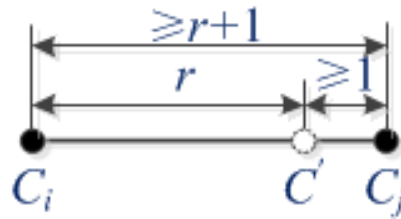


# 差错编码的检错能力

❖ 差错编码可分为检错码与纠错码 知道错误还能恢复。

❖ 对于检错码，如果编码集的汉明距离  $d_s=r+1$ ，则该差错编码可以检测  $r$  位的差错

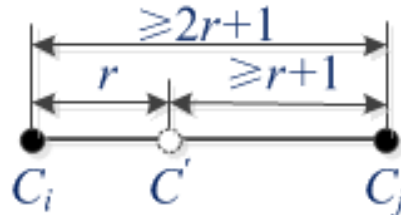
编码集汉明距离：  
编码集内所有有效码字，任意2个  
码字之间汉明距离的最小值。



→ 对应比特位不同的  
位数。

■ 例如，编码集 {0000, 0101, 1010, 1111} 的汉明距离  $d_s=2$ ，可以100%检测1比特差错 重复码

❖ 对于纠错码，如果编码集的汉明距离  $d_s=2r+1$ ，则该差错编码可以纠正  $r$  位的差错



概率最大化  
无效码字 → 距离最近  
有效码字

■ 例如，编码集 {000000, 010101, 101010, 111111} 的汉明距离  $d_s=3$ ，可以纠正1比特差错，如100010纠正为101010。

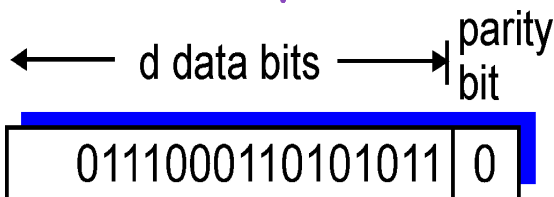


# 奇偶校验码

## 1 比特校验位:

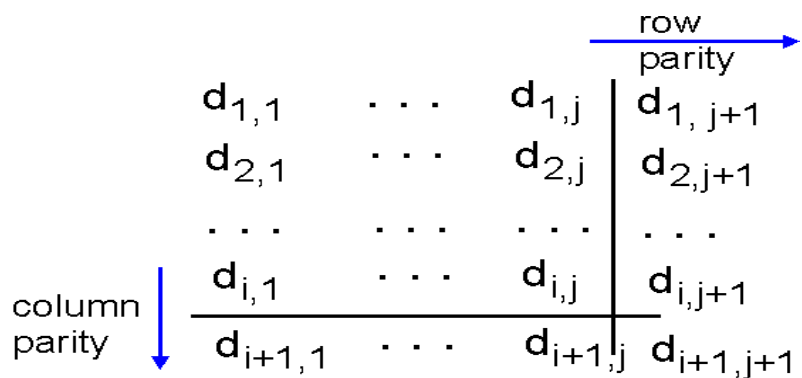
- ❖ 检测奇数位差错

1个数奇数



## 二维奇偶校验:

- ❖ 检测奇数位差错、部分偶数位差错
- ❖ 纠正同一行/列的奇数位错



1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

no errors

1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

correctable  
single bit error

纠错

# Internet校验和(Checksum)

## 发送端:

- ❖ 将“数据”(校验内容)划分为16位的二进制“整数”序列
- ❖ 求和(sum): 补码求和(最高位进位的“1”, 返回最低位继续加)
- ❖ 校验和(Checksum): sum的反码
- ❖ 放入分组(UDP、TCP、IP)的校验和字段  
→ 头部校验

## 接收端:

- ❖ 与发送端相同算法计算
- ❖ 计算得到的"checksum":
  - 为16位全0 (或sum为16位全1): 无错
  - 否则: 有错



# 循环冗余校验码(CRC)

- ❖ 检错能力更强大的差错编码 *数据链路层应用广泛*
- ❖ 将数据比特, **D**, 视为一个二进制数 *应用多项式理论*
- ❖ 选择一个 **r+1** 位的比特模式 (生成比特模式), **G**
- ❖ 目标: 选择 **r** 位的 **CRC** 比特, **R**, 满足
  - $\langle D, R \rangle$  刚好可以被 **G** 整除 (模 2)
  - 接收端检错: 利用 **G** 除  $\langle D, R \rangle$ , 余式全 0, 无错; 否则, 有错!
  - 可以检测所有突发长度 小于 r+1 位 差错。
- ❖ 广泛应用于实际网络 (以太网, 802.11 WiFi, ATM)



$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = D \ll r \oplus R$$



# CRC举例

期望:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

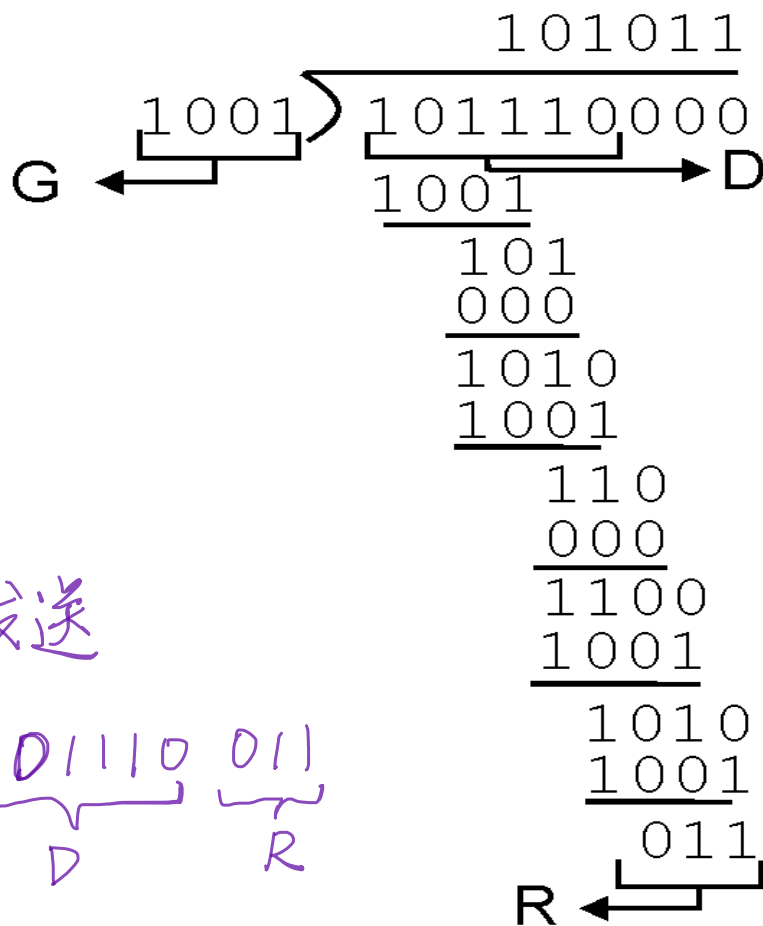
相当于:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

相当于:

如果利用G去除 $D \cdot 2^r$ , 则  
余式即为R:

$$R = \text{余式} \left[ \frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$







哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



立足航天，服务国防，面向国民经济主战场

谢谢！