1. **网络编码的基本概念和优缺点**
2. 基本概念

了解网络编码需要用到的基础知识：

异或，英文为exclusive OR，或缩写成xor，程序中有三种演算子：XOR、xor、⊕。

使用方法如下：

z = x ⊕ y

z = x xor y

C语言中异或符号为“^”。

运算法则：

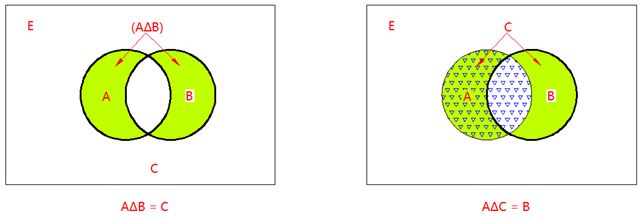
1. a ⊕ a = 0

2. a ⊕ b = b ⊕ a

3. a ⊕b ⊕ c = a ⊕ (b ⊕ c) = (a ⊕ b) ⊕ c;

4. d = a ⊕ b ⊕ c 可以推出 a = d ⊕ b ⊕ c.

5. a ⊕ b ⊕ a = b.



李硕彦教授等**[5]**以著名的“蝴蝶网络”(Butterfly Network)模型为例，阐述了网络编码的基本原理。如图1所示的“单信源二信宿”蝴蝶网络，设各个链路容量为1，S是信源节点，Y和Z是信宿节点，其余为中间节点。根据“最大流最小割”定理，该多播的最大理论传输容量为2，即理论上信宿Y和Z能够同时收到信源S发出的2个单位的信息,，也就是说能同时收到b1和b2。图1(a)表示的是传统的路由传输方式，节点W执行存储和转发操作。假定W转发信息b1，则链路WX、XY和XZ上传输的信息均为b1，虽然信宿Z收到b1和b2，但信宿Y却只能收到b1 (同时收到一个多余的b1)，因此信宿Y和Z无法同时收到b1和b2，该多播不能实现最大传输容量。



（a） （b）

图1　“单信源二信宿”蝴蝶网络

图1(b)表示的是网络编码方法，节点W对输入的信息进行模二加操作，然后将操作结果发送至输出链路WX，然后又通过链路XY和XZ，最终达到信宿Y和Z。Y收到b1和后，通过译码操作就能解出b2，因此，信宿Y同时收到了b1和b2。同理，通过译码操作，信宿Z也同时收到b1和b2。由此，基于网络编码的多播实现了理论上的最大传输容量。可见，网络编码的核心思想是：具备编码条件的网络节点(比如该节点的入度至少为2，如图1中的节点W就具备编码条件，节点X则不具备编码条件)对接收到的信息进行一定方式的处理(编码) ，然后传输给下一级的网络节点，收到消息的下一级节点如果具备编码条件，又对其接收的信息按照同样的方式进行处理和传输，如此反复，直到所有经过处理后的信息都汇聚到信宿节点为止。最后，在信宿节点，通过逆过程的操作(译码) ，即可译出信源发送的原始信息。网络编码是发生在域Fq 上的操作, 如果域F q无限大，则运用网络编码的多播传输能达到理论上的最大传输容量等于各信宿节点的最大流的最小值，即h= min max flow(ti)， ti∈T。

**以上是以最简单的“蝴蝶网络”为例，阐述了网络编码的基本概念。**

1. 主要优缺点

网络编码提出的初衷是为使多播传输达到理论上的最大传输容量，从而能取得较路由多播更好的网络吞吐量。但随着研究的深入，网络编码其它方面的优点也体现出来，如均衡网络负载、提升带宽利用率等。如果将网络编码与其它应用相结合，则能提升该应用系统的相关性能。

* 提高网络吞吐量

提升吞吐量是网络编码最主要的优点。无论是均匀链路还是非均匀链路，网络编码均能够获得更高的多播容量，而且对于节点平均度数越大，网络编码在网络吞吐量上的优势越明显. 从理论上可证明：如果为信源节点的符号空间，为通信网络中的节点数目，则对于每条链路都是单位容量的通信网络，基于网络编码的多播的吞吐量是路由多播的倍**[16 ]**.

* 均衡网络负载

网络编码多播可有效利用除多播树路径外其它的网络链路，可将网络流量分布于更广泛的网络上，从而均衡网络负载。图2(a)所示的通信网络，其各链路容量为2。图2(b)表示的是基于多播树的路由多播，为使各个信宿节点达到最大传输容量，该多播共使用SU、UX、UY、SW和WZ 共5条链路，且每条链路上传输的可行流为2；图2(c)表示的是基于网络编码的多播，假定信源节点S对发送至链路SV的信息进行模二加操作，则链路SV、VX和VZ上传输的信息均为, 最终信宿X、Y和Z均能同时收到a和b。容易看出，图2(c)所示的网络编码多播所用的传输链路为9条，比图2(b)的多播树传输要多4条链路，即利用了更广泛的通信链路，因此均衡了网络负载。网络编码的这种特性，有助于解决网络拥塞等问题。



（a） （b） （c）

图2 单源三接收网络

* 提高带宽利用率

提高网络带宽利用率是网络编码的另一个显著的优点。在图2(b)中的路由多播中，为了使得信宿X、Y和Z能够同时收到2个单位的信息，共使用了5条通信链路，每条链路传输可行流为2，因此其消耗的总带宽为：5×2= 10.。在图2(c)表示的网络编码多播中，共使用了9条链路，每条链路传输可行流为1，其消耗总带宽为：9×1= 9，因此带宽消耗节省了10% ，提高了网络带宽利用率。

此外，通过网络编码，可以抵抗网络链路和节点的非各态历经失败对网络链接的影响，提高网络链接的鲁棒性，减小网络管理的开销。如果用在无线网络中，还能节省传输能耗，增加传输的安全性等；如果用在P2P 文件共享系统中, 除了能够显著提高下载效率，还能有效应对节点动态加入和离开、链路失效和网络带宽吞噬等问题。

虽然网络编码优点突出，但运用网络编码增加了计算的复杂性，而且网路节点需要缓存足够的输入信息，因此编码操作增加了传输时延和节点的额外的I/O、CPU消耗.。一些学者对网络编码的综合性能进行了初步的研究和探讨。统计数据表明，即使应用最有效的随机网络编码，其编码和译码的时间也不容忽视。此外，应用网络编码还存在同步问题，这主要是由于信宿节点必须等待收到足够的编码信息，才能开始译码。同步问题给在实时系统中应用网络编码提出了挑战。