

- 流水线最大并发力度是切分力度
- 再进一步是空间并发，再加一台计算机
- 应用需求：计算密集，数据密集，网络密集
- 时间并行：流水线
- 空间并行：多处理器
- 数据并行：若干相同子任务
- 任务并行：相互依赖的子任务

并行设计：问题，划分。通信，组合，映射

网络直径：任意两节点最长距离（转发有延迟）

对剖宽度：切成两半需要移除的最小边数

对称网络：从任意节点观察网络都一样

静态网络：点到点链接不变

动态网络：用交换开关构成，动态改变链接组态（立交桥）

性能与成本平衡，鲁棒

静态

| 静态互连网络特性比较 |                              |         |  |                       |    |                   |
|------------|------------------------------|---------|--|-----------------------|----|-------------------|
| 网络名称       | 网络规模                         | 节点度     | 网络直径                                   | 对剖宽度                  | 对称 | 链路数               |
| 线性阵列       | $N$                          | 2       | $N - 1$                                | 1                     | 非  | $N - 1$           |
| 环形         | $N$                          | 2       | $\lfloor N/2 \rfloor$ (双向)             | 2                     | 是  | $N$               |
| 2-D网孔      | $(\sqrt{N} \times \sqrt{N})$ | 4       | $2(\sqrt{N} - 1)$                      | $\sqrt{N}$            | 非  | $2(N - \sqrt{N})$ |
| Illiac网孔   | $(\sqrt{N} \times \sqrt{N})$ | 4       | $\sqrt{N} - 1$                         | $2\sqrt{N}$           | 非  | $2N$              |
| 2-D环绕      | $(\sqrt{N} \times \sqrt{N})$ | 4       | $2\lfloor \sqrt{N}/2 \rfloor$          | $2\sqrt{N}$           | 是  | $2N$              |
| 二叉树        | $N$                          | 3       | $2(\lceil \log N \rceil - 1)$          | 1                     | 非  | $N - 1$           |
| 星形         | $N$                          | $N - 1$ | 2                                      | $\lfloor N/2 \rfloor$ | 非  | $N - 1$           |
| 超立方        | $N = 2^n$                    | n       | n                                      | $N/2$                 | 是  | $nN/2$            |
| 立方环        | $N = k \cdot 2^k$            | 3       | $\frac{2k-1}{2} + \lfloor k/2 \rfloor$ | $N/2$                 | 是  | $3N/2$            |

1、一维线性（二近邻）

- 直径N-1，对剖宽度1

- 鲁棒性低，节点比线路容易坏，软件比硬件容易坏

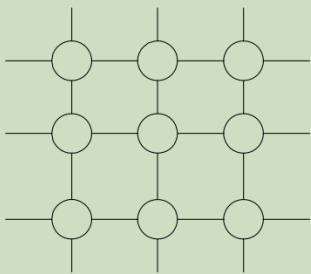
#### 需要容错计算

- 首位相连可以让对剖宽度变为2，直径变成 $N/2$

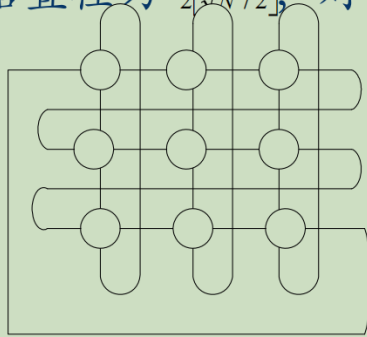
## 2、二维网孔 (网格)

- 直径 $2\sqrt{N}$ ，对剖 $\sqrt{N}$
- 十字路口选择引流，减少延迟
- 双向环路，直径减半，对剖 $\times 2$

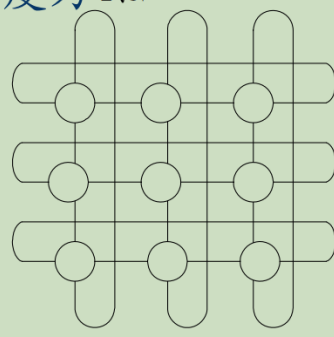
- \* 每个节点只与其上、下、左、右的近邻相连（边界节点除外），节点度为4，网络直径为 $2(\sqrt{N}-1)$ ，对剖宽度为 $\sqrt{N}$
- \* 在垂直方向上带环绕，水平方向呈蛇状，就变成Illiac网孔了，节点度恒为4，网络直径为 $\sqrt{N}-1$ ，而对剖宽度为 $2\sqrt{N}$
- \* 垂直和水平方向均带环绕，则变成了2-D环绕（2-D Torus），节点度恒为4，网络直径为 $2\lfloor\sqrt{N}/2\rfloor$ ，对剖宽度为 $2\sqrt{N}$



(a) 2-D网孔



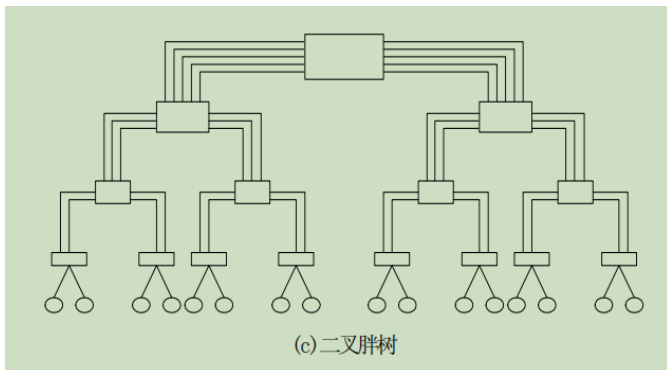
(b) Illiac网孔



(c) 2-D环绕

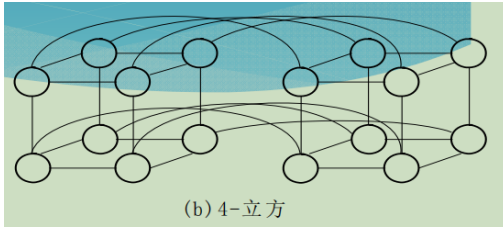
## 3、二叉树

- 节点度3，对剖1，直径很低 $\log N$
- 二叉胖树

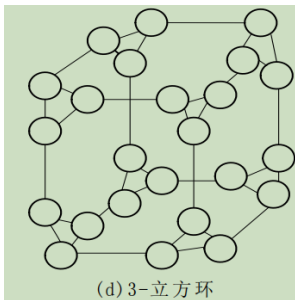


(c) 二叉胖树

## 4、超立方



- $n$ 立方有 $2^n$ 个点
- 4立方和2-D环绕等价?
- 每个维度坐标只有零和1
- 度 $n$ , 直径 $n$ , 对剖 $N/2$
- 提升冗余: 3-立方环, 度3
- $n$ -立方环:  $N=n \cdot 2^n$



## 嵌入

每个节点用一个网络替代

- \* 用膨胀 (Dilation) 系数来描述嵌入的质量, 它是指被嵌入网络中的一条链路在所要嵌入的网络中对应所需的最大链路数
- \* 如果该系数为1, 则称为完美嵌入。
- \* 环网可完美嵌入到2-D环绕网中
- \* 超立方网可完美嵌入到2-D环绕网中

## 动态

### 总线

- 并发力度1, 开关复杂度 $O(n)$

### 交叉开关

- 方格开关控制每个cpu和每个MM的通信, 缺点硬件太多 $O(n^2)$
- 多级互联MIN (Omega): 任意输入可以通过状态组合到达所有输出 (二叉树结构)  $O(n \lg n)$
- 共享程度高导致冲突力度高

快排最差很差，但平均下来 $n\lg n$ ，所以喜欢用  
归并排序最差 $n\lg n$