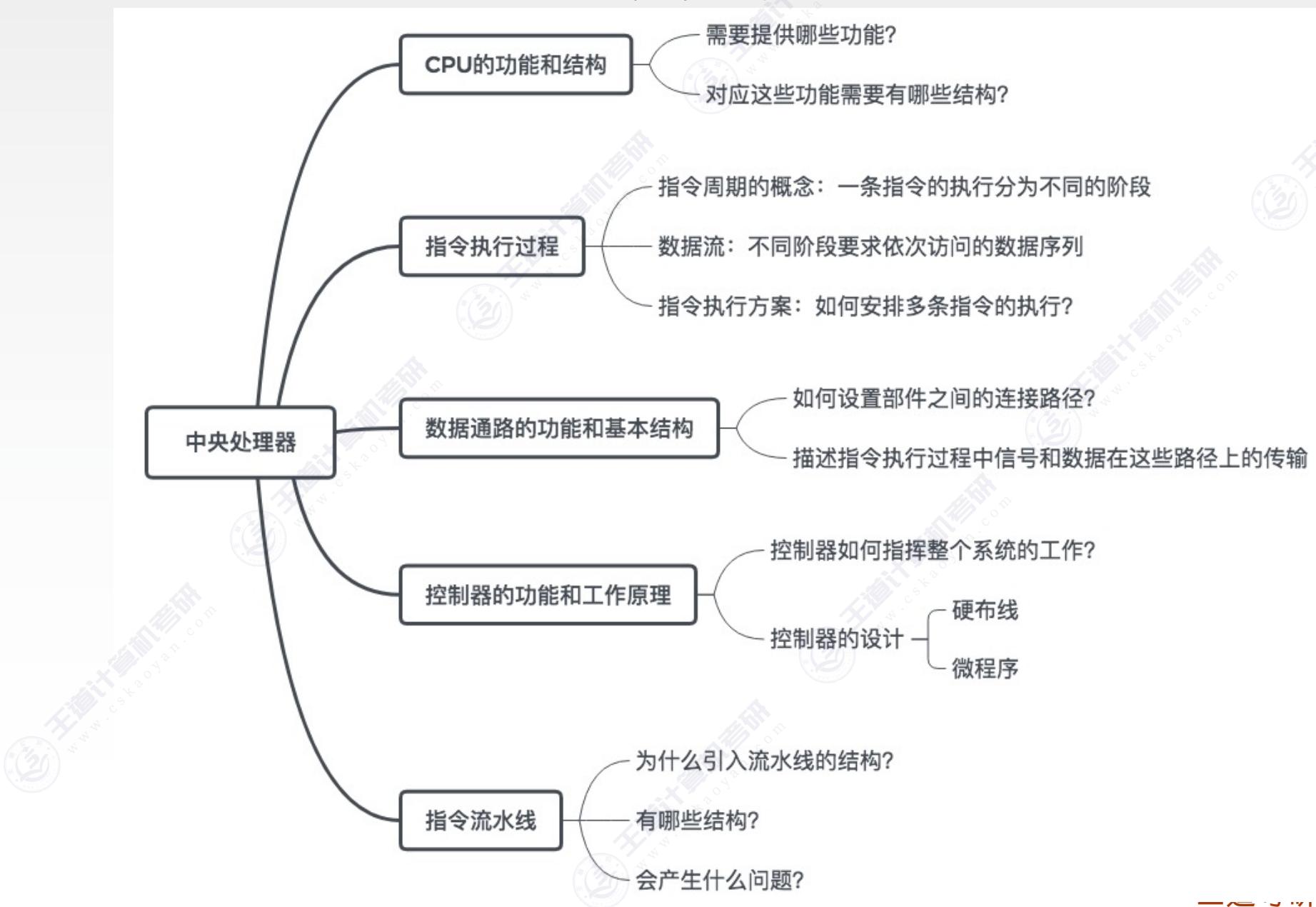


本节内容

中央处理器

指令流水线
基本概念
性能指标

本章总览



指令流水的定义

一条指令的执行过程可以分成多个阶段（或过程）。

根据计算机的不同，具体的分法也不同。

取指	分析	执行
----	----	----

特点：每个阶段用到的硬件不一样。

取指：根据PC内容访问主存储器，取出一条指令送到IR中。

分析：对指令操作码进行译码，按照给定的寻址方式和地址字段中的内容形成操作数的有效地址EA，并从有效地址EA中取出操作数。

执行：根据操作码字段，完成指令规定的功能，即把运算结果写到通用寄存器或主存中。

设取指、分析、执行3个阶段的时间都相等，用 t 表示，按以下几种执行方式分析 n 条指令的执行时间：

1. 顺序执行方式 总耗时 $T = n \times 3t = 3nt$



传统冯·诺依曼机采用顺序执行方式，又称串行执行方式。

优点：控制简单，硬件代价小。

缺点：执行指令的速度较慢，在任何时刻，处理机中只有一条指令在执行，各功能部件的利用率很低。

指令流水的定义

1. 顺序执行方式

$$\text{总耗时 } T = n \times 3t = 3nt$$



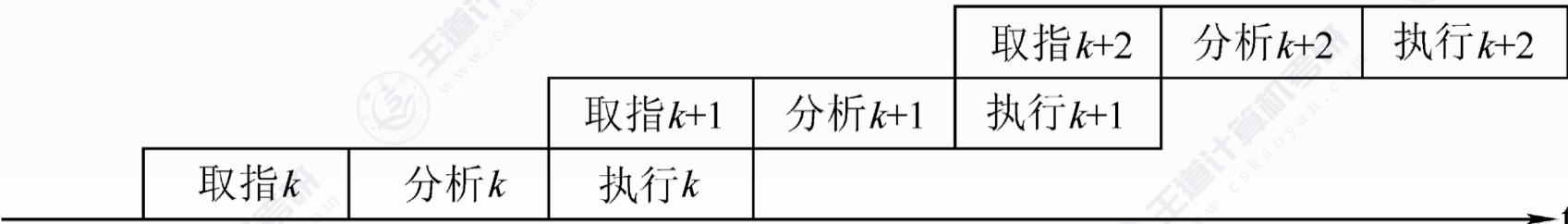
传统冯·诺依曼机采用顺序执行方式，又称串行执行方式。

优点：控制简单，硬件代价小。

缺点：执行指令的速度较慢，在任何时刻，处理机中只有一条指令在执行，各功能部件的利用率很低。

2. 一次重叠执行方式

$$\text{总耗时 } T = 3t + (n-1) \times 2t = (1+2n)t$$



优点：程序的执行时间缩短了1/3，各功能部件的利用率明显提高。

缺点：需要付出硬件上较大开销的代价，控制过程也比顺序执行复杂了。

指令流水的定义

1. 顺序执行方式

$$\text{总耗时 } T = n \times 3t = 3nt$$



传统冯·诺依曼机采用顺序执行方式，又称串行执行方式。优点：控制简单，硬件代价小。

缺点：执行指令的速度较慢，在任何时刻，处理机中只有一条指令在执行，各功能部件的利用率很低。

2. 一次重叠执行方式

$$\text{总耗时 } T = 3t + (n-1) \times 2t = (1+2n)t$$

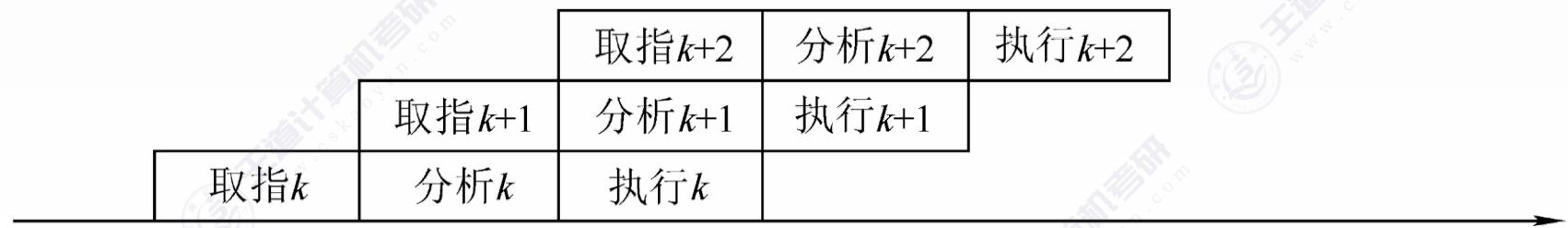


优点：程序的执行时间缩短了 $1/3$ ，各功能部件的利用率明显提高。

缺点：需要付出硬件上较大开销的代价，控制过程也比顺序执行复杂了。

3. 二次重叠执行方式

$$\text{总耗时 } T = 3t + (n-1) \times t = (2+n)t$$



与顺序执行方式相比，指令的执行时间缩短近 $2/3$ 。这是一种理想的指令执行方式，在正常情况下，处理机中同时有3条指令在执行。

注：也可以把每条指令的执行过程分成4个或5个阶段，分成5个阶段是比较常见的做法。

流水线的表示方法

1. 指令执行过程图

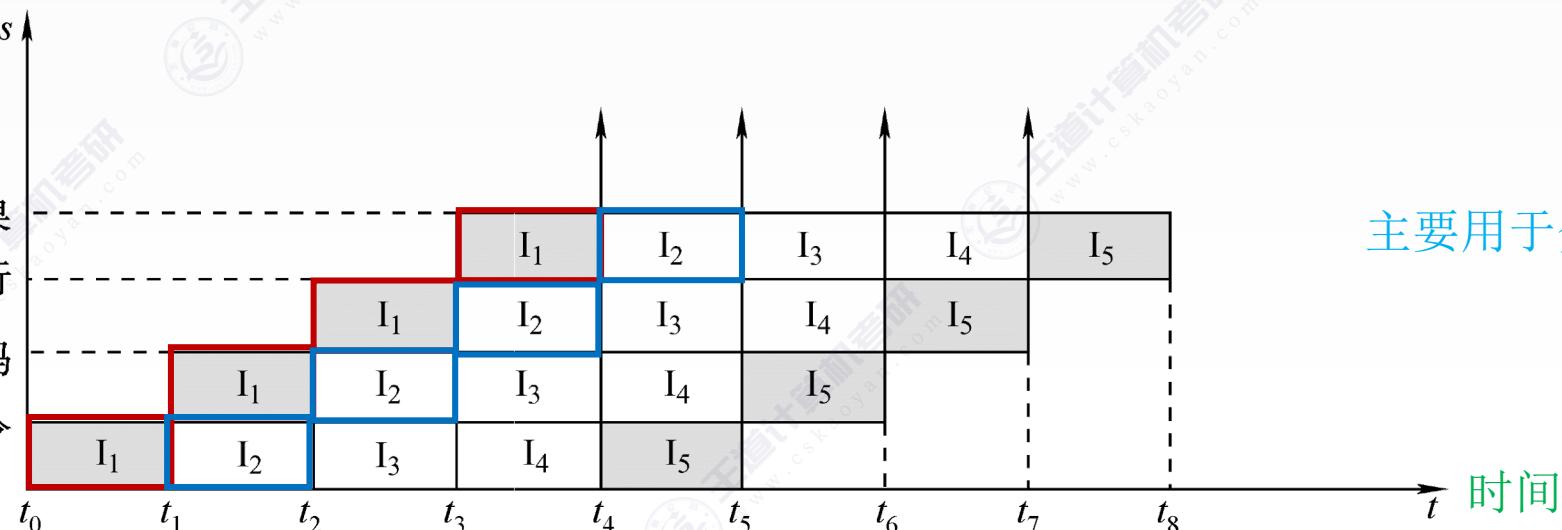


主要用于分析指令执行过程以及影响流水线的因素(见下一个视频)

2. 时空图

空间：不同的阶段所对应的不同的硬件资源

存结果
执行
译码
取指令



主要用于分析流水线的性能

流水线的性能指标



1. 吞吐率
2. 加速比
3. 效率

流水线的性能指标

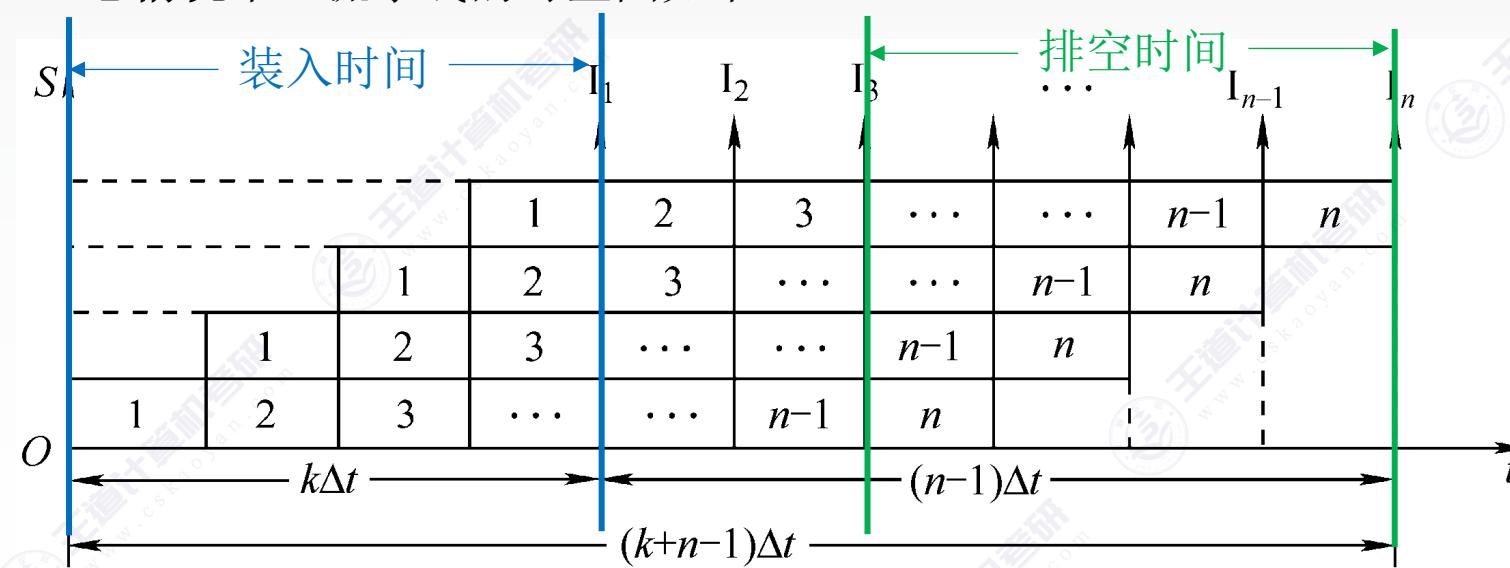
1. 吞吐率 吞吐率是指在单位时间内流水线所完成的任务数量，或是输出结果的数量。

设任务数为 n ；处理完成 n 个任务所用的时间为 T_k

则计算流水线吞吐率（TP）的最基本的公式为 $TP = \frac{n}{T_k}$

理想情况下，流水线的时空图如下：

当连续输入的任务 $n \rightarrow \infty$ 时，得最大吞吐率为 $TP_{max} = 1/\Delta t$ 。



$$T_k = (k+n-1) \Delta t$$

流水线的实际吞吐率为

$$TP = \frac{n}{(k+n-1)\Delta t}$$

一条指令的执行分为 k 个阶段，每个阶段耗时 Δt ，一般取 Δt = 一个时钟周期

流水线的性能指标

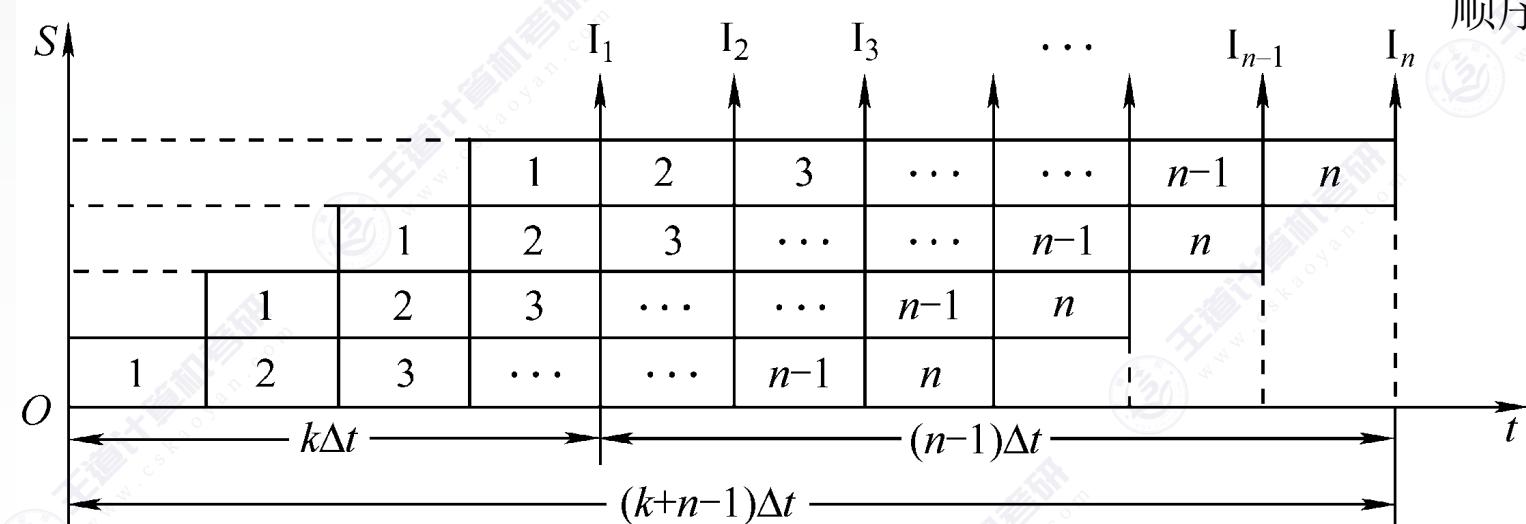


2. 加速比 完成同样一批任务，不使用流水线所用的时间与使用流水线所用的时间之比。

设 T_0 表示不使用流水线时的执行时间，即顺序执行所用的时间； T_k 表示使用流水线时的执行时间

则计算流水线加速比 (S) 的基本公式为 $S = \frac{T_0}{T_k}$ 当连续输入的任务 $n \rightarrow \infty$ 时，最大加速比为 $S_{\max} = k$ 。

理想情况下，流水线的时空图如下：



一条指令的执行分为 k 个阶段，每个阶段耗时 Δt ，一般取 Δt = 一个时钟周期

单独完成一个任务耗时为 $k \Delta t$ ，则
顺序完成 n 个任务耗时 $T_0 = nk \Delta t$

$$T_k = (k+n-1) \Delta t$$

实际加速比为

$$S = \frac{kn\Delta t}{(k+n-1)\Delta t} = \frac{kn}{k+n-1}$$

流水线的性能指标

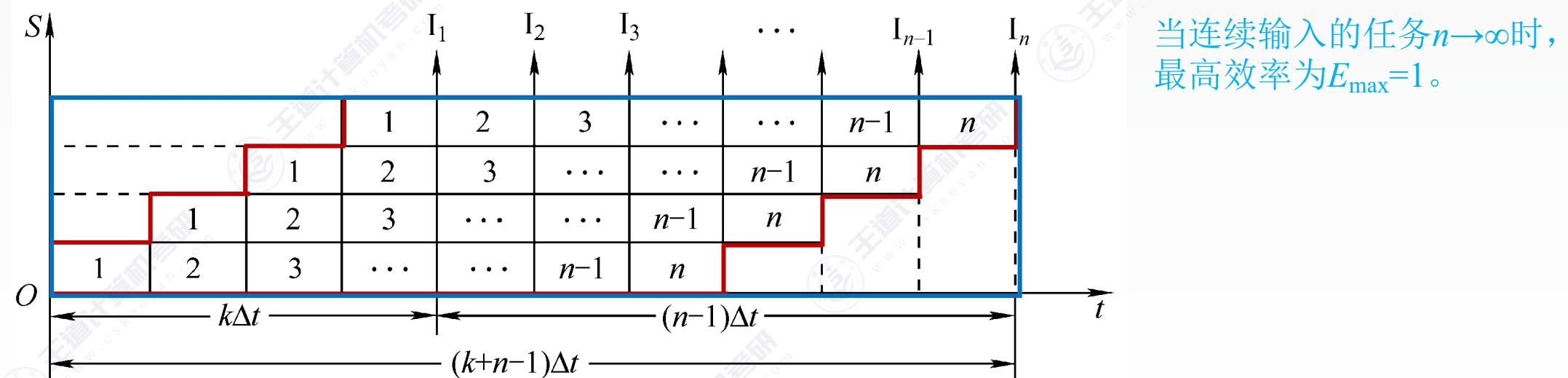
3. 效率

流水线的设备利用率为流水线的效率。

在时空图上，流水线的效率定义为完成 n 个任务占用的时空区有效面积与 n 个任务所用的时间与 k 个流水段所围成的时空区总面积之比。

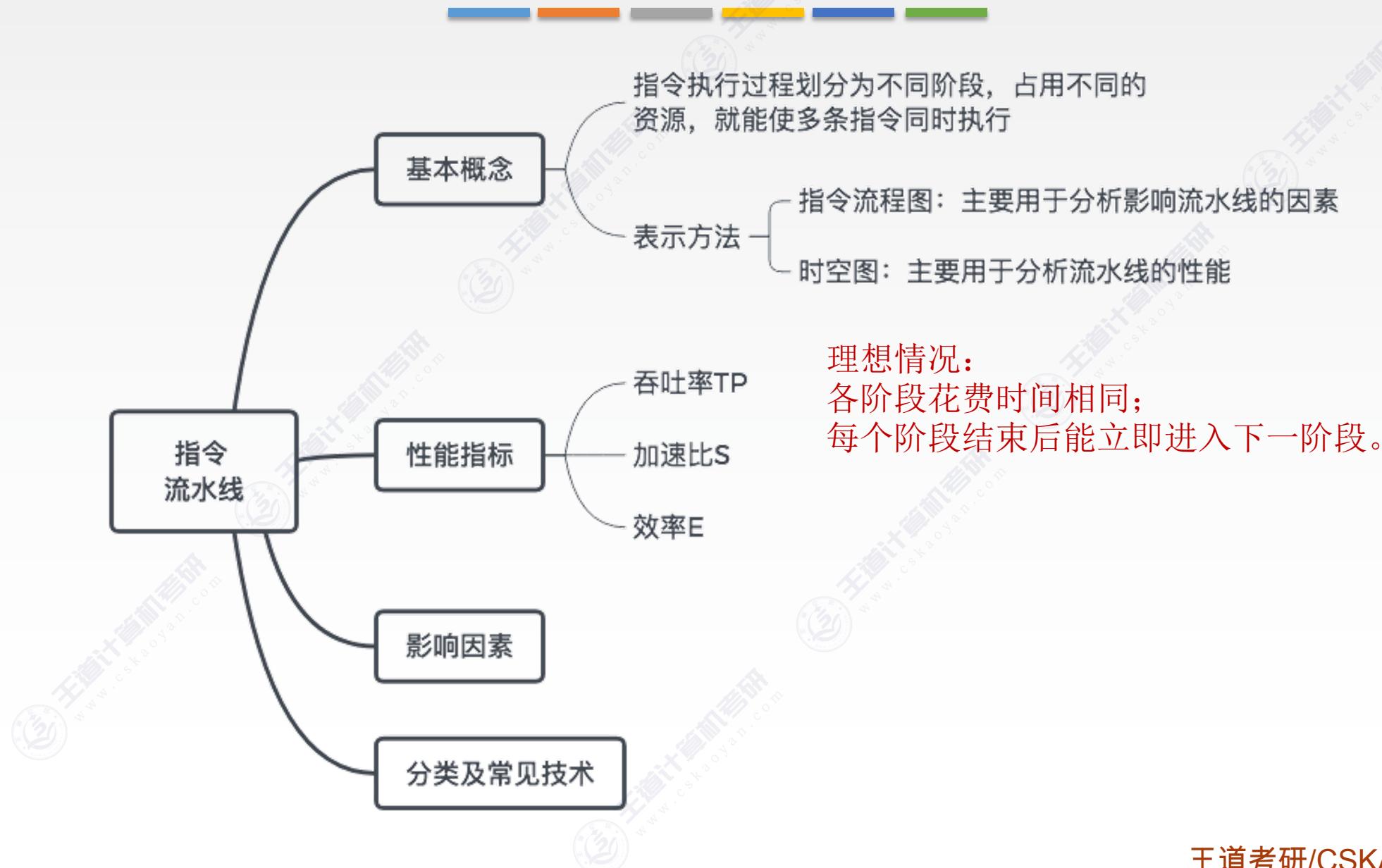
则流水线效率 (E) 的一般公式为 $E = \frac{n\text{个任务占用}k\text{时空区有效面积}}{n\text{个任务所用的时间与}k\text{个流水段所围成的时空区总面积}} = \frac{T_0}{kT_k}$

理想情况下，流水线的时空图如下：



一条指令的执行分为 k 个阶段，每个阶段耗时 Δt ，一般取 Δt = 一个时钟周期

本节回顾





公众号：王道在线



b站：王道计算机教育



抖音：王道计算机考研