

如图 11-2-1 所示，采用流水线执行方式，在第 1 个 T 时间内，第 1 条指令在取指令，其余两个部件空闲。在第 2 个 T 时间内，第 1 条指令完成取指令，直接交给第 2 个部件进行分析，同时取指令部件可以去取第 2 条指令。此时有两条指令在运行，只有执行部件空闲。在第 3 个 T 时间内，第 1 条指令可以直接进入执行部件执行，第 2 条指令直接进入分析部件分析，取指令部件可以去取第 3 条指令。此时 3 个部件都在工作，同时有 3 条指令在运行。

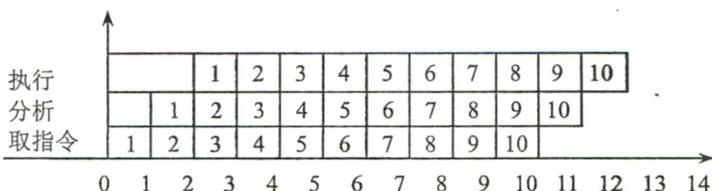


图 11-2-1 流水线时空图

以此类推，可以看到，每经过一个 T 时间，就会有一条指令执行完毕，因此执行 N 条指令的总时间是 $3T+(n-1)\times T$ ，也就是第 1 条指令从开始执行到执行完毕的总时间是 $3T$ ，以后每隔一个 T 时间就会多完成一条指令。因此只要再过 $(n-1)\times T$ 时间后，余下的 $n-1$ 条指令都会执行完毕。从上面的分析还可以看出，在线性流水线中，执行时间最长的那段变成了整个流水线的瓶颈。一般来说，将其执行时间称为流水线的周期。所以执行的总时间主要取决于流水操作步骤中最长的那个操作。

据此得出：设流水线由 N 段组成，每段所需时间分别为 Δt_i ($1\leq i\leq N$)，完成 M 个任务的实际时间为 $\sum_{i=1}^n \Delta t_i + (M-1)\Delta t_j$ ，其中 Δt_j 为时间最长的那一段的执行时间。

【例 11-1】若指令流水线把一条指令分为取指、分析和执行三部分，且三部分的时间分别是 $t_{\text{取指}}=2\text{ns}$ 、 $t_{\text{分析}}=2\text{ns}$ 、 $t_{\text{执行}}=1\text{ns}$ ，则 100 条指令全部执行完毕需要多长时间？

从题中可以看出，三个操作中，执行时间最长的操作时间是 $T=2\text{ns}$ ，因此总时间为 $(2+2+1)+(100-1)\times 2=5+198=203\text{ns}$ 。

11.2.2 流水线的性能指标

流水线的主要性能指标有吞吐率、加速比和效率。

(1) 吞吐率。吞吐率是指计算机中的流水线在单位时间内可以处理的业务或执行指令的个数。

[例 11-1] 中执行 100 条指令的吞吐率可以表示为 $TP = \frac{N}{T} = \frac{100}{203 \times 10^{-9}}$ ，其中 N 表示指令的条数，

T 表示执行完 N 条指令的时间。

(2) 加速比。加速比是指某一流水线采用串行模式的工作速度与采用流水线模式的工作速度的比值。加速比的数值越大，说明这条流水线的工作安排方式越好。

[例 11-1] 中，若串行执行 100 条指令的时间是 $T_1=5 \times 100=500\text{ns}$ ，采用流水线工作方式的时间