哈爾濱工業大學（深圳）

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

操作系统 (Operating System)

第四章 CPU调度与优化:CPU调度

夏文 副教授

哈尔滨工业大学（深圳）

2021年秋季

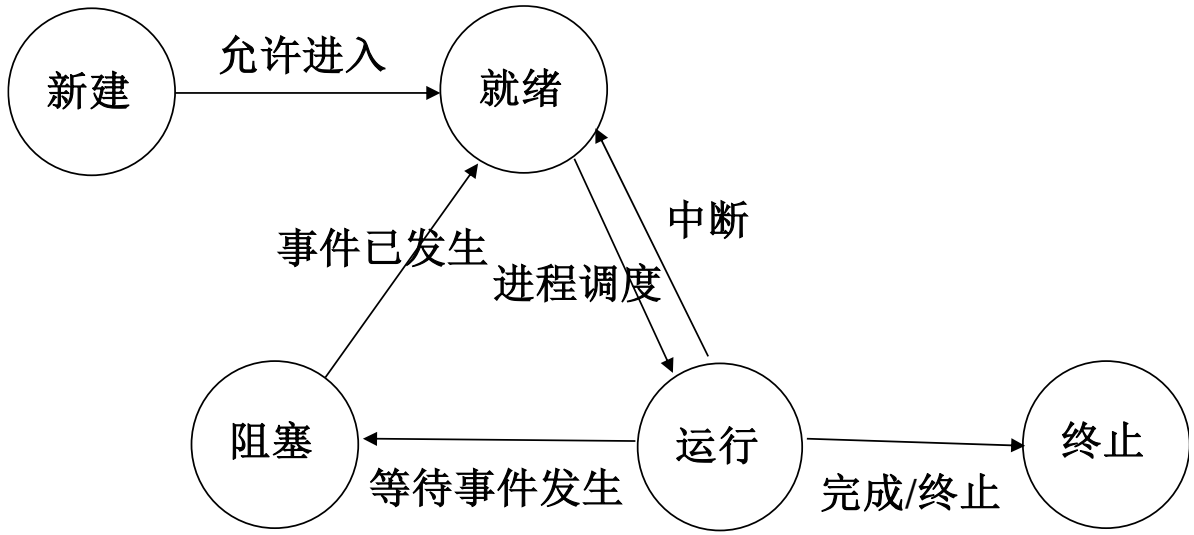
Email：xiawen@hit.edu.cn

本章主要内容

- CPU调度基本概念与调度算法
  - 基本概念
  - 调度准则
  - 调度算法
- CPU调度与程序优化
  - 为何要优化代码
  - 深入理解现代处理器
  - 常用程序优化方法

什么是处理器 (CPU)调度？

操作系统按照一定的策略从就绪队列当中选择一个进程，将CPU的使用权交给该进程。



进程状态变化图（五状态）

调度资源： CPU的使用权或CPU的时间片。

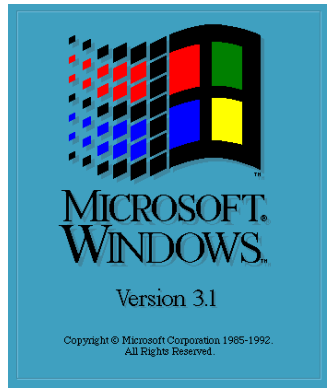
调度对象：进程或线程。其方式与原则是一样的，故经常以进程来说明。

进程调度 <==> CPU调度

非抢占式调度与抢占式调度

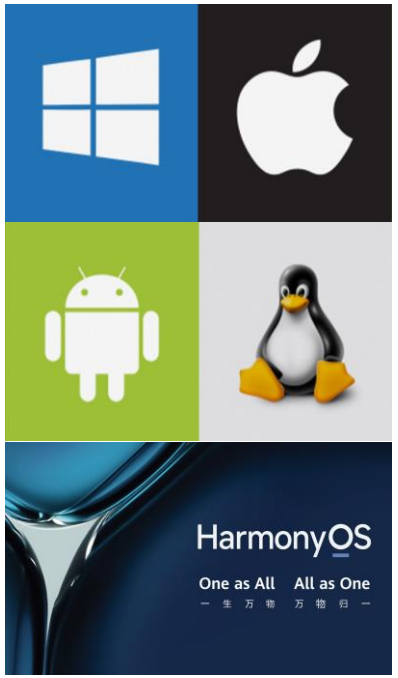
- **非抢占式调度：**（任务完成或阻塞）主动让出CPU，调度程序将CPU分配给某就绪进程的调度方式。
  - 因等待某些事件而让出CPU
  - 进程的任务完成了，自动终止退出

早期的多道批处理操作系统

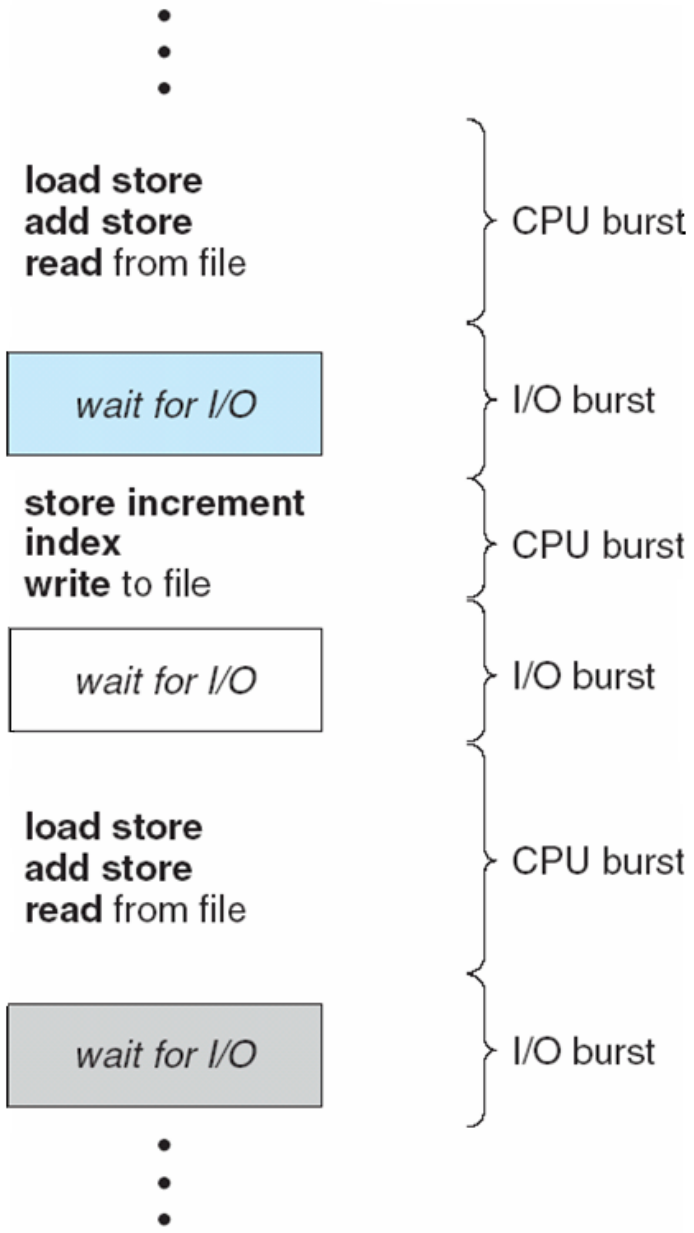


- **抢占式调度：**操作系统将正在运行的进程强行暂停，由调度程序将CPU分配给其他就绪进程的调度方式。
  - 规定的时间片到了
  - 出现了优先级更高的进程

大多数现代操作系统采用。



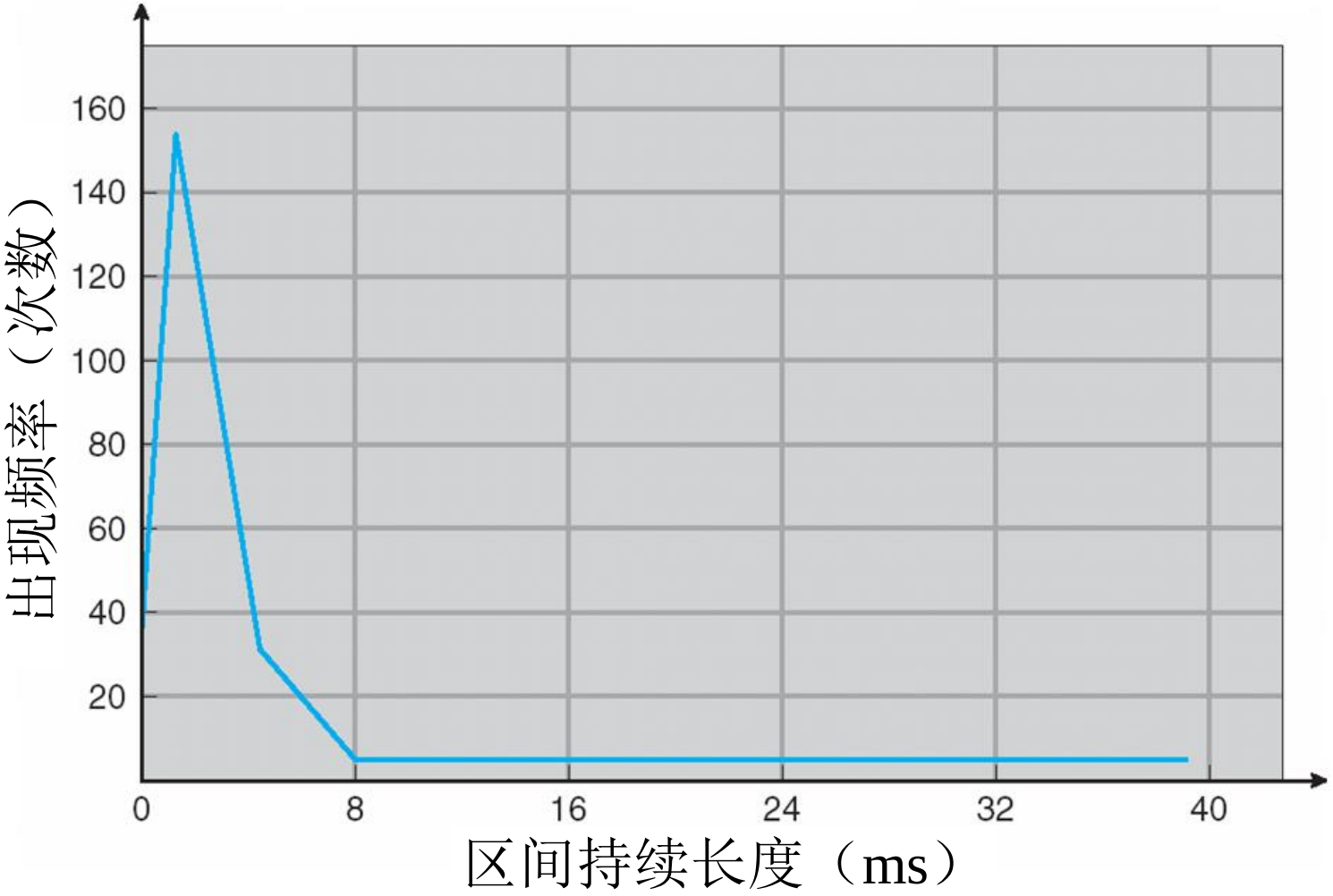
CPU-I/O区间周期



- 程序代码可以分为计算类代码和I/O类代码
- 进程执行过程由CPU执行和I/O等待周期组成
- CPU约束型程序以计算为主，CPU区间会较多，还会有少量长的CPU区间
- I/O约束型程序以I/O为主，但配合I/O处理会有大量短的CPU区间

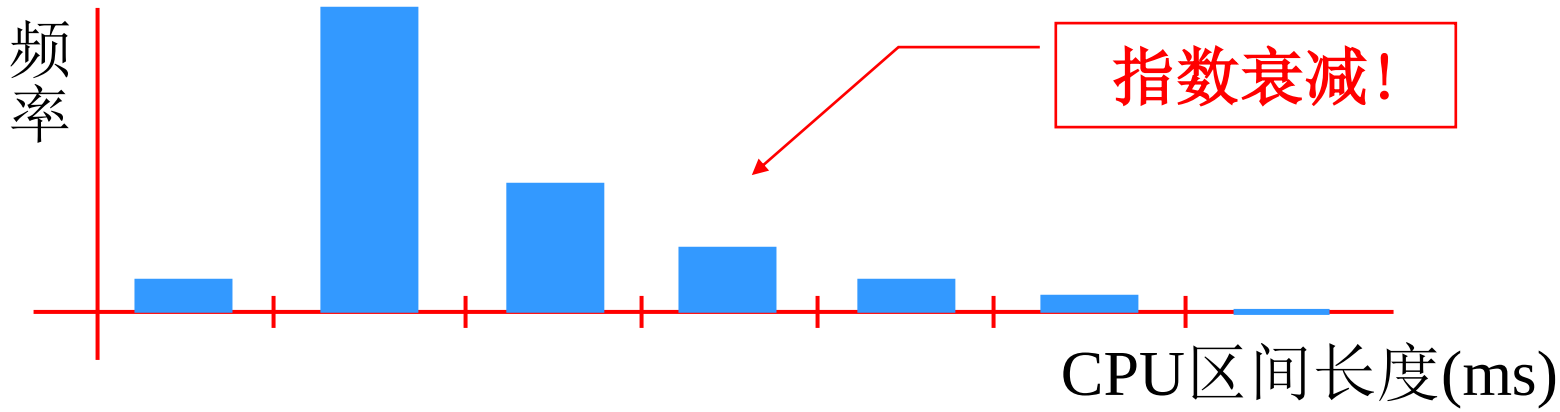
CPU-I/O区间周期

- 实验证明：进程中，短的CPU区间出现的几率极高

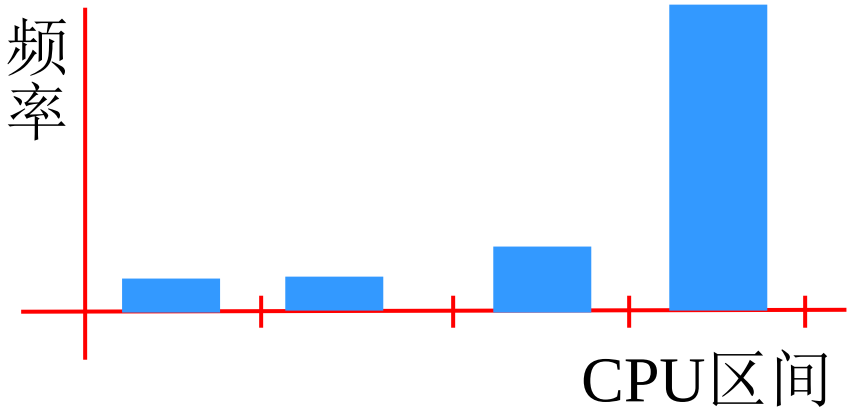


任务的CPU-IO区间的周期特性

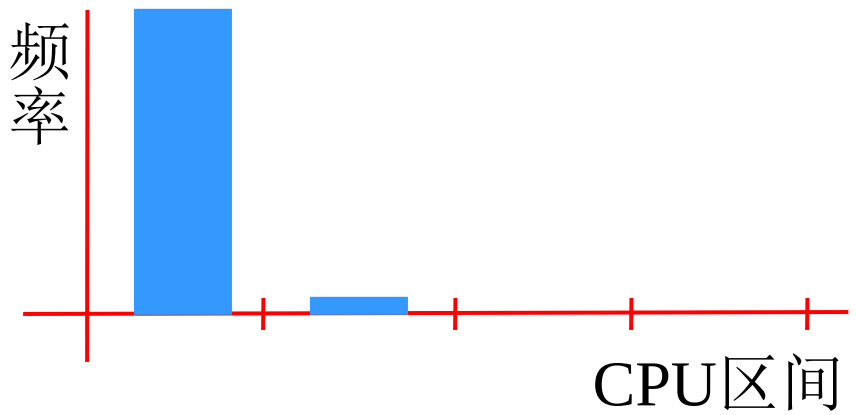
- 一般任务生存期: I/O(载入), CPU, I/O, ... , CPU ... exit()



- CPU-约束型



- I/O-约束型



CPU调度遵循哪些准则？

- **公平、高效：**合理地分配CPU，CPU要尽可能的忙，提高CPU利用率。

（1）提高系统运算的吞吐量　　（2）缩短进程的周转时间

（3）缩短进程的等待时间　　（4）提高用户的响应满意度

- **评价标准**
  - **吞吐量：**单位时间完成的任务数量
  - **周转时间：**从任务提交到任务结束的时间，即为任务完成时刻减去任务到达就绪队列的时刻。 $T_{周转时间} = T_{完成时刻} - T_{到达时刻}$
  - **等待时间：**任务在就绪队列中等待的时间总和
  - **响应时间：**从用户输入到产生反应的时间，即从任务到达就绪队列到首次运行的时间： $T_{响应时间} = T_{首次运行时刻} - T_{到达时刻}$

CPU调度准则存在的矛盾

■ 响应时间与公平性之间的矛盾

- ➢响应时间短 ⇒ 前台任务的优先级高
- ➢前台任务优先调度 ⇒ 后台任务得不到CPU

批处理系统

- ■ 周转时间（短）
- ■ 吞吐量（大）

■ 吞吐量和响应时间之间的矛盾

- ➢吞吐量大 ⇒ 时间片大
- ➢时间片大 ⇒ 响应时间长

交互式系统

- ■ 响应时间（短）

协调多个目标是操作系统之所以复杂的一个重要原因，也是复杂系统的一个基本特点。

CPU调度算法

- （1）先到先服务调度 First Come, First Served (FCFS)
- （2）最短作业优先调度 Shortest Job First (SJF)
- （3）优先级调度
- （4）轮询法调度 Round-Robin (RR)
- （5）多级反馈队列 Multilevel Feedback Queue Scheduling (MLFQ)
- （6）彩票算法

先到先服务调度 (FCFS) (1/3)

- 调度的顺序是任务到达就绪队列的顺序。

暂不考虑上下文切换的消耗

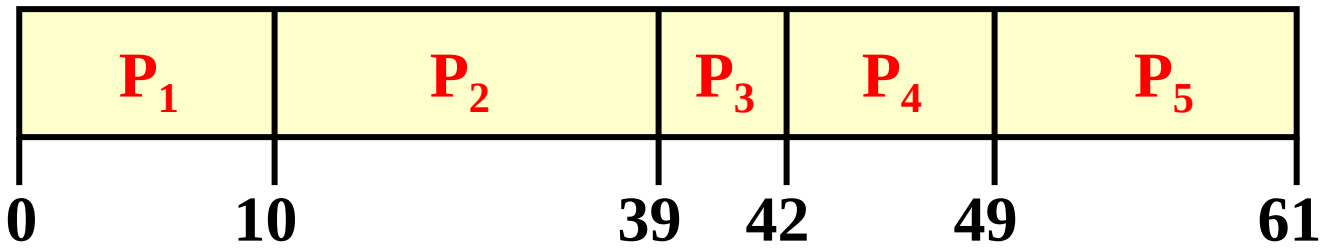
- 一个实例

  假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5;

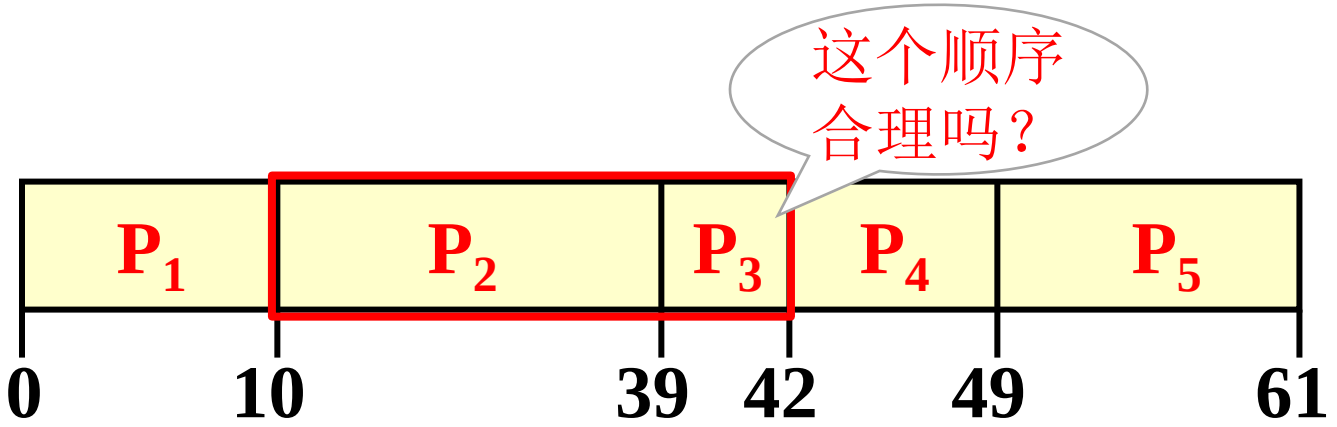
  到达时刻都为0。

任务	CPU区间(ms)
P_1	10
P_2	29
P_3	3
P_4	7
P_5	12

- 调度结果



先到先服务调度 (FCFS) (2/3)



- 平均等待时间：等待时间:任务在就绪队列中等待的时间总和

  (0+10+39+42+49)/5 = 28

- 平均周转时间：$T_{周转时间} = T_{完成时刻} - T_{到达时刻}$

  ((10-0)+(39-0)+(42-0)+(49-0)+(61-0))/5 = 40.2

- 平均响应时间：$T_{响应时间} = T_{首次运行时刻} - T_{到达时刻}$

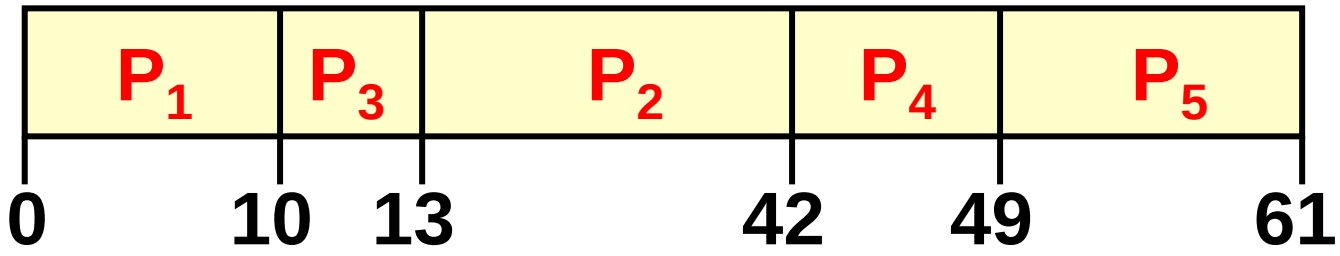
  (0+(10-0)+(39-0)+(42-0)+(49-0))/5 = 28

公平、简单；

非抢占、不适合交互式

先到先服务调度 (FCFS) (2/3)

- 未考虑任务特性，平均等待时间可以缩短



- 平均等待时间：(0+10+13+42+49)/5 = 22.8
- 平均周转时间：((10-0)+(13-0)+(42-0)+(49-0)+(61-0))/5 = 35
- 平均响应时间：(0+(10-0)+(13-0)+(42-0)+(49-0))/5 = 22.8

最短作业优先调度 (SJF) (1/3)

- 最短的作业(CPU区间长度最小)最先调度。

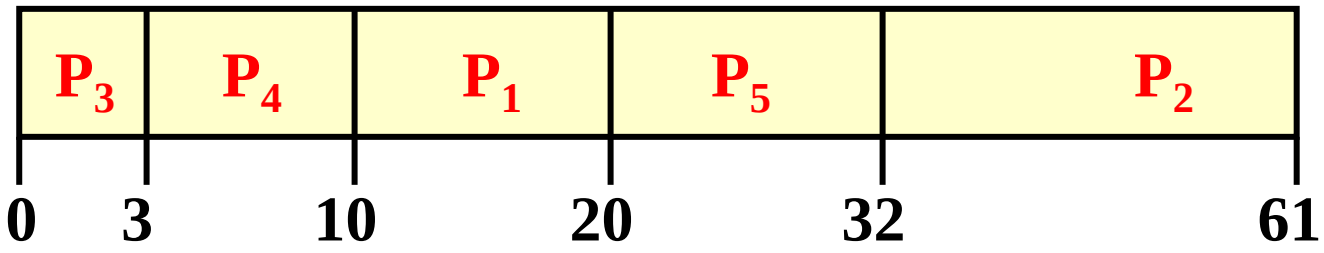
暂不考虑上下文切换的消耗

- 一个实例

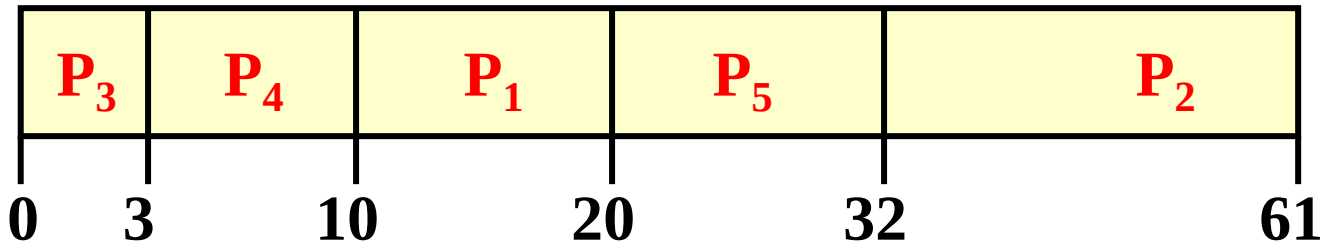
假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5；到达时刻都为0。

任务	CPU区间(ms)
P_1	10
P_2	29
P_3	3
P_4	7
P_5	12

- 调度结果



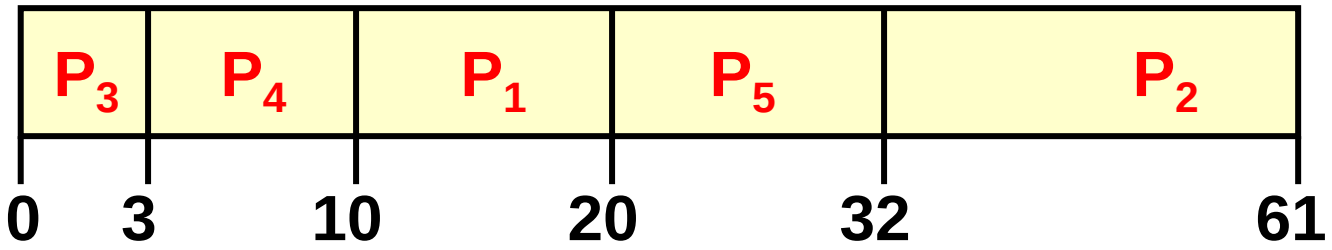
最短作业优先调度 (SJF) (2/3)



- 平均等待时间：(0+3+10+20+32)/5 = 13 **< 28**
- 平均周转时间：((3-0)+(10-0)+(20-0)+(32-0)+(61-0))/5 = 25.2 **< 40.2**
- 平均响应时间：(0+(3-0)+(10-0)+(20-0)+(32-0)) / 5 = 13 **< 28**

任务到达的时间有先后怎么办?

最短作业优先调度 (SJF) (3/3)



证明：同时到达作业SJF可以保证最小的平均等待时间

设$P_1P_2\ldots P_n$是调度结果序列，p_i是任务CPU区间大小。显然该调度序列的平均等待时间为:

$$0 + p_1 + p_1+p_2+ p_1+p_2+p_3 + \ldots. = \sum(n\text{-}i)p_i$$

如果存在$i<j$而$p_i>p_j$，交换p_i,p_j调度顺序会减小上值。

最短剩余作业优先调度 (SRJF) (1/3)

- 最短剩余作业最先调度Shortest Remaining Job First (SRJF) SJF的可抢占版本
- 一个实例

  假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5。
- 调度结果：

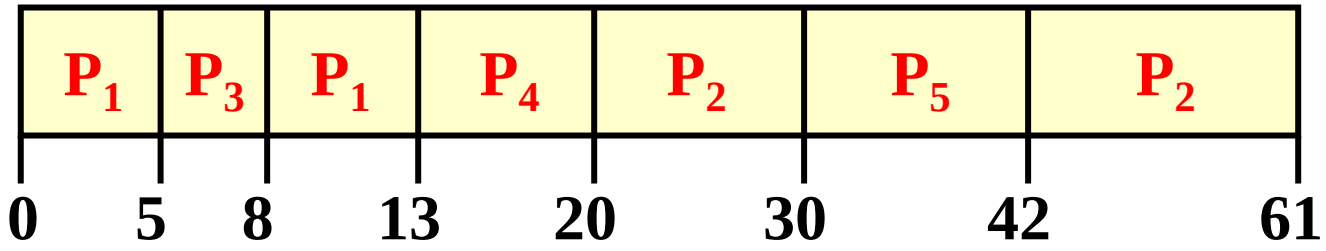
任务	到达时间 (ms)	CPU区间 (ms)
P_1	0	10
P_2	0	29
P_3	5	3
P_4	5	7
P_5	30	12

最短剩余作业优先调度 (SRJF) (2/3)

- 最短剩余作业最先调度Shortest Remaining Job First (SRJF) SJF的可抢占版本
- 一个实例

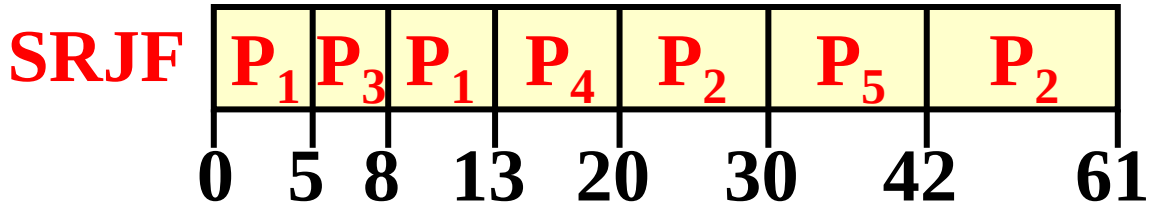
  假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5。

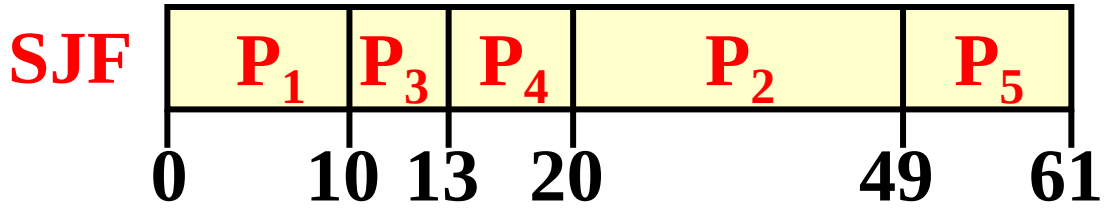
- 调度结果：



任务	到达时间 (ms)	CPU区间 (ms)
P_1	0	10
P_2	0	29
P_3	5	3
P_4	5	7
P_5	30	12

最短剩余作业优先调度 (SRJF) (3/3)





- 平均等待时间(SRJF)：
  (3+32+0+8+0)/5 = 8.6
- 平均周转时间(SRJF)：
  ((13-0)+(61-0)+(8-5)+(20-5)+(42-30))/5 =20.8
- 平均响应时间(SRJF)：
  (0+(20-0)+(5-5)+(13-5)+(30-30))/5=5.6

- 平均等待时间(SJF)：
  (0+20+5+8+19)/5 = 10.4
- 平均周转时间(SJF)：
  ((10-0)+(49-0)+(13-5)+(20-5)+(61-30))/5 = 22.6
- 平均响应时间(SJF)：
  (0+(20-0)+(10-5)+(13-5)+(49-30)) /5 = 10.4

抢占显然具有优点，但CPU区间必须是已知！

如何知道下一CPU区间大小？

根据历史进行预测：指数平均法

$\tau_{n+1} = \alpha t_n + (1-\alpha)\tau_n$，$\tau_{n+1}$是预测值，$t_n$是当前CPU区间

$\tau_n = \alpha t_{n-1} + (1-\alpha)\tau_{n-1}$，$\tau_{n-1} = \alpha t_{n-2} + (1-\alpha)\tau_{n-2}$ ……

$\tau_{n+1} = \alpha t_n + (1-\alpha)\alpha t_{n-1} + \ldots + (1-\alpha)^j \alpha t_{n-j} + \ldots + (1-\alpha)^{n+1}\tau_0$

最近信息　　历史信息

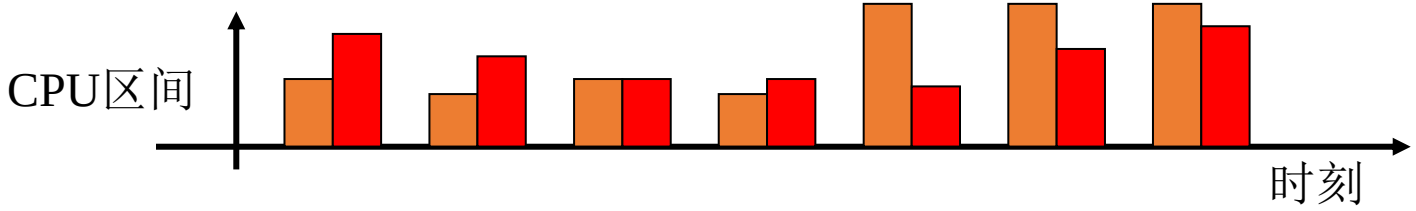
α用来控制最近信息和历史信息对预测的作用

α→0：忽略近期，关注历史；

α→1：关注当前；

通常α=0.5。

CPU区间(t_i):	6	4	6	4	13	13	13	
预测结果(τ_i):	10	8	6	6	5	9	11	12

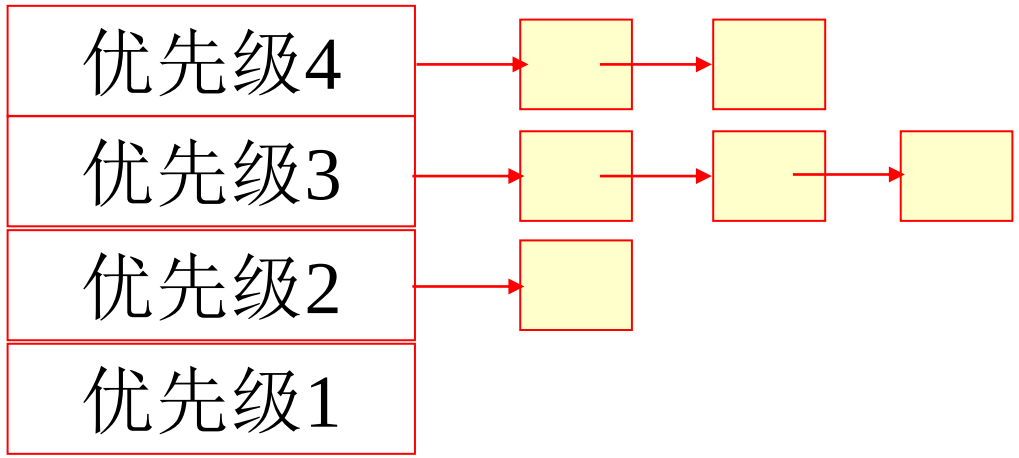


SJF的一般化: 优先权调度

每个任务关联一个优先权，调度优先权最高的任务

实例1：I/O bound任务应获得更大的优先权，使得I/O尽量忙，并和CPU并行工作。优先级设为1/f，f为CPU区间所占的比重。

实例2：定义多个优先队列: 前台任务、后台任务。只有高优先级队列为空时才调度其他任务。

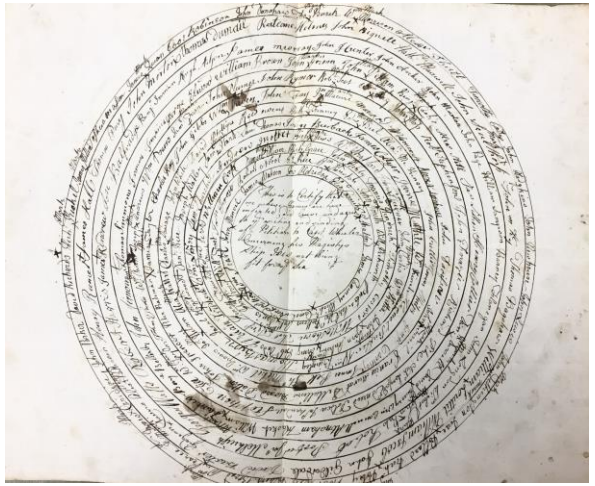


轮询调度算法 (RR) (1/3)

- **轮询调度算法(Round-Robin)按时间片来轮转调度**
- **一个实例**

  假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5；到达时刻都为0，时间片为10。

- **调度结果：**



任务	CPU区间(ms)
P_1	10
P_2	29
P_3	3
P_4	7
P_5	12

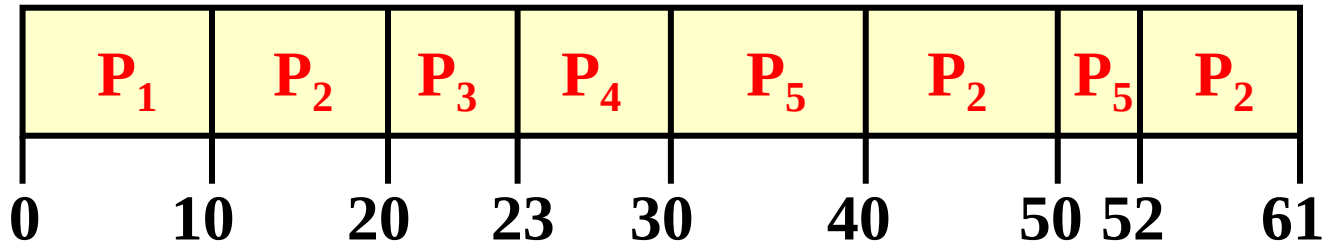
轮询调度算法 (RR) (1/3)

- 轮询调度算法(Round-Robin)按时间片来轮转调度
- 一个实例

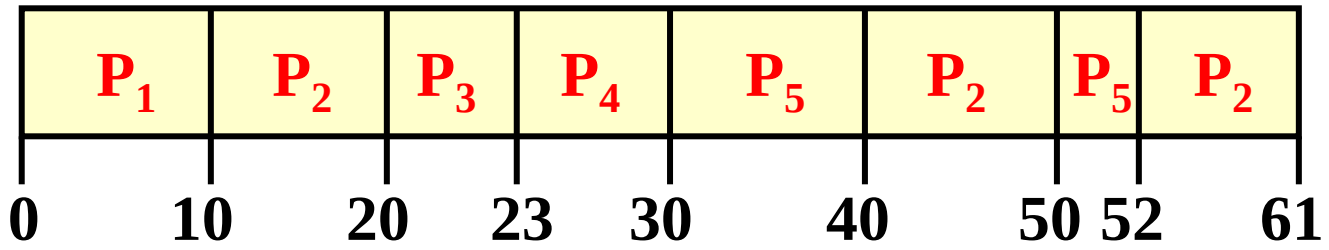
  假定任务的到达顺序为: P_1，P_2，P_3，P_4，P_5；到达时刻都为0，时间片为10。

任务	CPU区间(ms)
P_1	10
P_2	29
P_3	3
P_4	7
P_5	12

- 调度结果：



轮询调度算法 (RR) (2/3)



上下文切换次数：
FCFS: 4次
SJF: 4次
RR: 7次

- 平均周转时间：

((10-0)+(61-0)+(23-0)+(30-0)+(52-0))/5 = 35.2

FCFS: 40.2

SJF: 25.2

- 平均响应时间：

(0+(10-0)+(20-0)+(23-0)+(30-0))/5 = 16.6

FCFS: 28

SJF: 13

- 平均等待时间：

(0+32+20+23+40)/5 = 23

FCFS: 28

SJF: 13

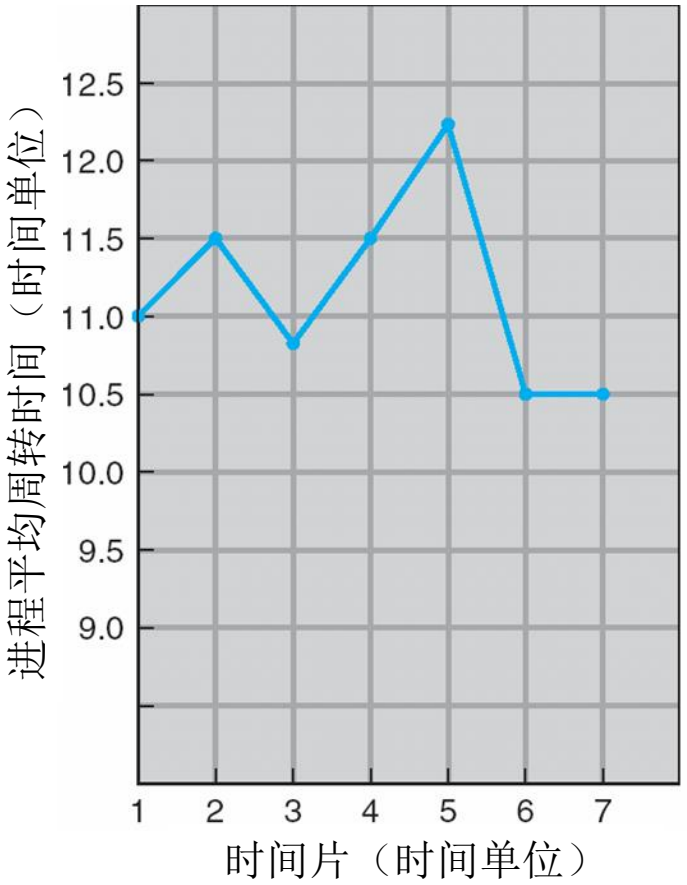
RR优点: 定时有响应，响应时间较短

RR缺点: 上下文切换次数较多

RR中的时间片该如何设定? (3/3)

- 时间片太大
  - 如时间片500ms，10任务的队列里，每5s才能响应一个任务
  - 响应时间太长
- 时间片太小
  - 如时间片20ms，上下文切换5ms，需要20%的切换代价
  - 吞吐量变小，周转时间变长
- 折中：时间片10-100ms，切换时间0.1-1ms(1%)

RR调度例子：周转时间与时间片



process	time
P_1	6
P_2	3
P_3	1
P_4	7

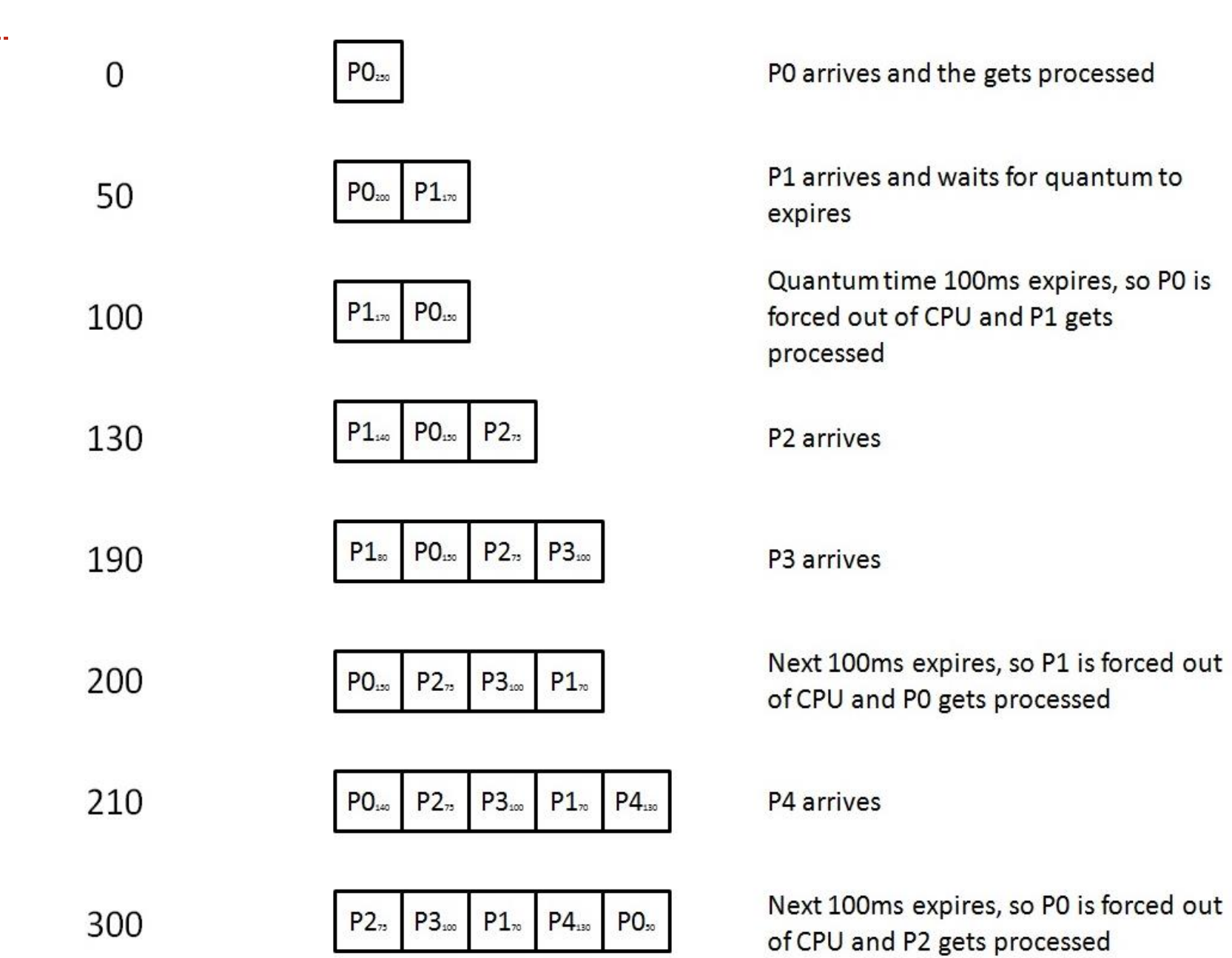
时间片	进程切换过程																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P4	P1	P2	P4	P1	P4	P1	P4	P1	P4	P4
2	P1		P2		P3	P4		P1		P2	P4		P1		P4		P4
3	P1			P2			P3	P4			P1			P4			P4
4	P1				P2			P3	P4				P1		P4		
5	P1					P2			P3	P4					P1	P4	
6	P1						P2			P3	P4						P4
7	P1						P2			P3	P4						

时间片	P1周转时间	P2周转时间	P3周转时间	P4周转时间	平均周转时间
1	15	9	3	17	44/4=11.0
2	14	10	5	17	46/4=11.5
3	13	6	7	17	43/4=10.75
4	14	7	8	17	46/4=11.5
5	15	8	9	17	49/4=12.25
6	6	9	10	17	42/4=10.5
7	6	9	10	17	42/4=10.5

当时间片≥7时
等同FCFS！

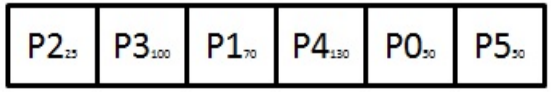
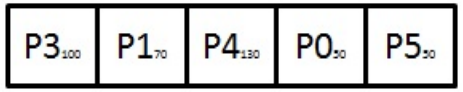
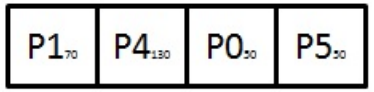
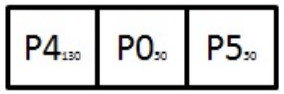
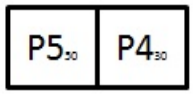
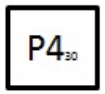
RR调度示例

ID	Arrival	Execute
P0	0	250
P1	50	170
P2	130	75
P3	190	100
P4	210	130
P5	350	50



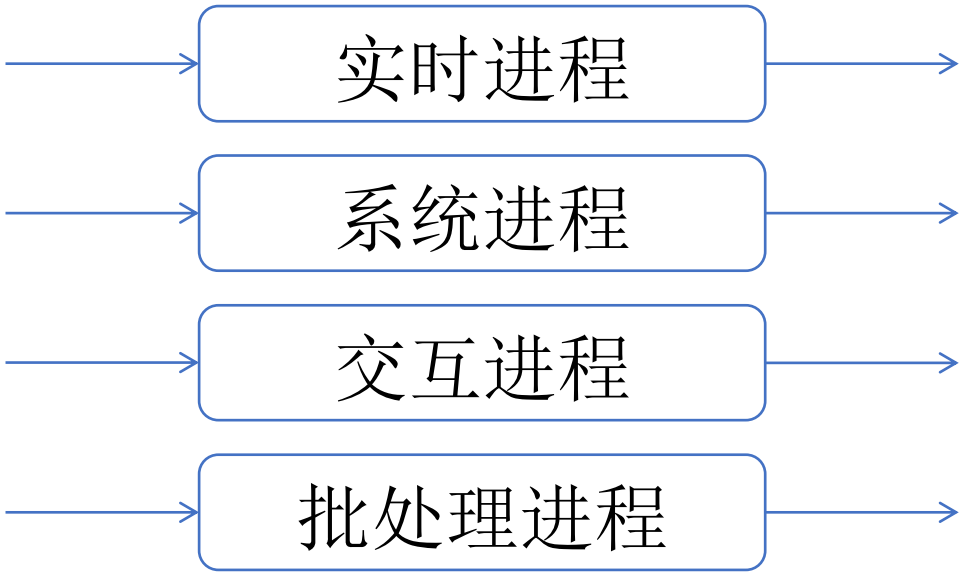
RR调度示例

ID	Arrival	Execute
P0	0	250
P1	50	170
P2	130	75
P3	190	100
P4	210	130
P5	350	50

350		P5 arrives
375		P2 gets completed, so P3 gets processed
475		P3 gets completed, so P1 gets processed
545		P1 gets completed, so P4 gets processed
645		Quantum time 100ms expires, so P4 is forced out of CPU and P0 gets processed
695		P0 gets completed, so P5 gets processed
745		P5 gets completed, so P4 gets processed
775		P4 gets completed

多级反馈队列 (MFQS) (1/2)

- 前面方法的缺陷：FCFS、SJF、RR这些算法任务都放置在单个队列上，可能需要进行O(n)的搜索。
- 将任务按照优先级分为多个队列，每次从优先级最高的队列选择任务，即多级队列(Multilevel Queue)。



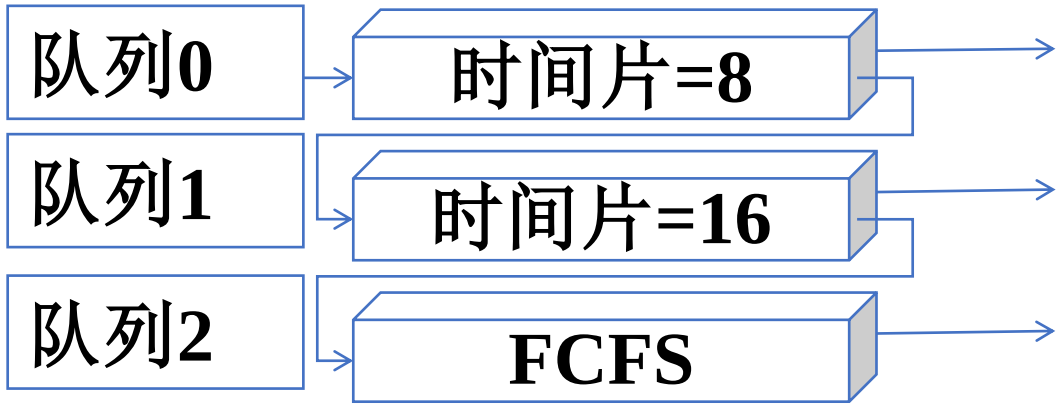
任务优先级无法改变，有可能存在饥饿进程。

一个有趣故事: 1973年关闭MIT的IBM 7094时，发现有一个进程在1967年提交但一直未运行。

怎么办呢？

多级反馈队列 (MFQS) (2/2)

- 根据任务的CPU周期将任务放置在不同的队列中，允许任务在队列间移动。
  - 使用太多CPU时间的任务会被放置在低优先级队列。
  - 在低优先级队列过久的任务会被移到高优先级队列（“老化” Aging）。



最为通用，但也是最为复杂的CPU调度算法。

多级反馈队列需要考虑如下参数：

- 队列的数目
- 每条队列的调度算法
- 将任务移动到高优先级队列的策略
- 将任务移动到低优先级队列的策略
- 为需要服务的任务分配队列的策略

彩票算法

- 除了优化响应时间、周转时间等指标，调度过程中也应该保证每个任务都获得一定比例的CPU时间。
- 彩票算法
  - 彩票数表示了任务应该接受到的资源份额
  - 彩票数百分比表示了其所占有的系统资源份额
- 有两个进程A和B
  - 进程A有75张彩票 → 占有75%的CPU时间
  - 进程B有25张彩票 → 占有25%的CPU时间

彩票算法

- 调度过程
  - 调度器随机选择彩票中奖号码
  - 加载中奖进程并运行它

- 例如：有100张彩票
  - 任务A有75张彩票，假设编码为0~74
  - 任务B有25张彩票，假设编码为75~99

调度器选择的中奖彩票：63 85 70 39 76 17

调度的结果：A B A A B A

随着运行时间的增加，两者得到的CPU时间比例会越接近期望。

CPU调度基本概念与调度算法总结

- 并发能提高效率 ⇒ 并发的核心是进程能让出CPU
- 进程让出CPU ⇒ 下一个进程使用CPU ⇒ 这个选择就是调度
- 进程、线程（内核级、用户级）都能调度 ⇒ 任务调度
- 调度任务分类: 交互式，批处理
- 调度时机分类: 抢占式、非抢占式
- CPU调度算法: FCFS、SJF、RR（交互式）、MLFQ、Lottery

习题

■1.现在有三个同时到达的作业J1、J2和J3，它们的执行时间分别是T1、T2和T3，而且T1<T2<T3。系统按单道方式运行且采用短作业优先调度算法，则平均周转时间是（　）。

A. T1+T2+T3

B. (3T1+2T2+T3)/3

C. (T1+T2+T3)/3

D. (T1+2T2+3T3)/3

习题

■2.下列有关时间片的进程调度的描述中，错误的是()

A. 时间片越短，进程切换的次数越多，系统开销也越大

B. 当前进程的时间片用完后，该进程状态由执行态变为阻塞态

C. 时钟中断发生后，系统会修改当前的进程在时间片内的剩余时间

D. 影响时间片大小的主要因素包括响应时间、系统开销和进程数量等

习题

■ 3 .假设4个任务到达系统的时刻和运行时间见下表。系统在t=2时开始作业调度。若分别采用先来先服务和最短任务优先调度算法，则选中的任务分别是(　)

作业	到达时间t	运行时间
J_1	0	3
J_2	1	3
J_3	1	2
J_4	3	1

A. J2、J3　　B. J1、J4

C. J2、J4　　D. J1、J3

Hope you enjoyed the OS course!