



# 离散事件系统仿真方法

# 目录

1

• 连续系统仿真与离散事件系统仿真

2

• 基本概念

3

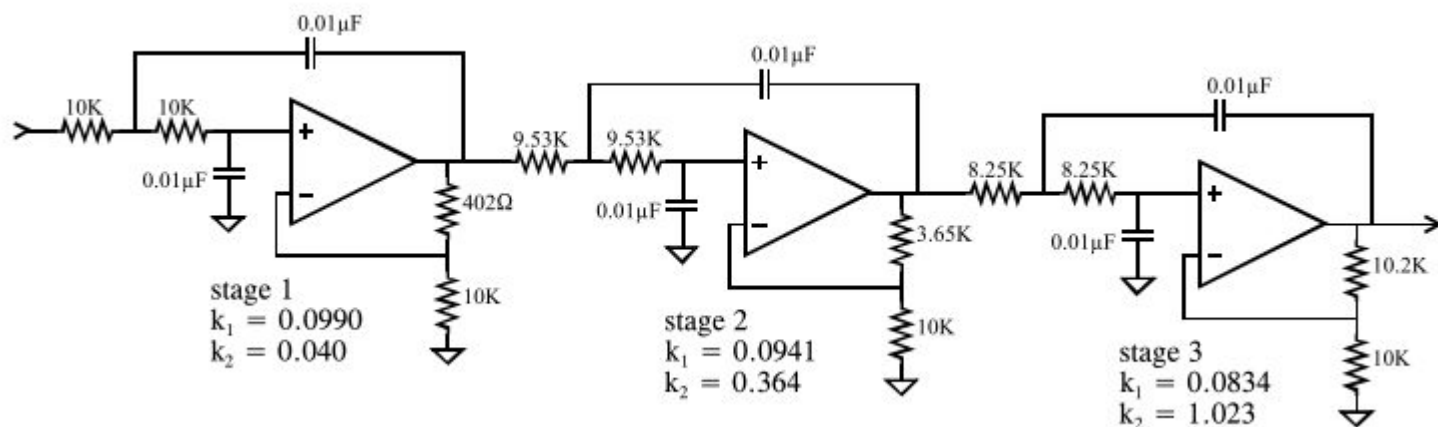
• 仿真策略

1

# 连续系统仿真与离散事件系统仿真

## 连续系统举例

- **典型的连续系统**：状态变化在时间上是连续的，可以用方程式描述系统模型。
  - 例：级联IIR滤波器
    - 可以看作三个二端口网络级联
    - 每一段的输入-输出模型（外部模型）都可以用常微分方程或传递函数表示。
- (电子电路课)

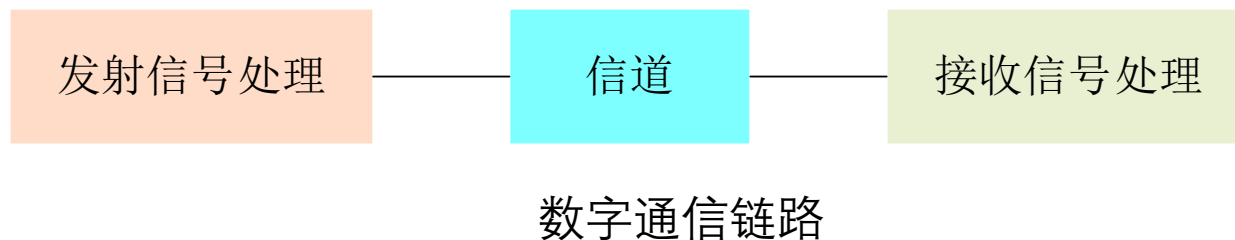


级联IIR滤波器

# 连续系统仿真与离散事件系统仿真

## 连续系统举例

- **非典型的连续系统**：数字信号处理系统
- 时间离散化的“**连续**”系统
- 例：数字通信链路
  - 发射机和接收机均以离散信号处理为主
  - 处理的是时间离散的信号
  - 但在信道中传输的是连续模拟信号
  - 这种系统的状态也是连续变化的
  - 属于连续系统



# 连续系统仿真与离散事件系统仿真

## 典型连续系统数学模型与仿真模型

► **连续系统**：系统本身的状态变量是连续变化的。

- **数学模型**：微分方程 
$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = c_1 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + c_1 \frac{d^{n-2} u}{dt^{n-1}} + \dots + c_n u$$
- **仿真模型**：差分方程->状态空间模型->数值积分；

时间离散化  
注意：规整采样  
而非随机

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned}$$

ODE求解器：  
欧拉法  
龙格库塔法  
线性多步法  
.....

函数

[全部展开](#)

### 非刚性求解器

ode45	求解非刚性微分方程 - 中阶方法
ode23	求解非刚性微分方程 - 低阶方法
ode113	求解非刚性微分方程 - 变阶方法

### 刚性求解器

ode15s	求解刚性微分方程和 DAE - 变阶方法
ode23s	求解刚性微分方程 - 低阶方法
ode23t	求解中等刚性的 ODE 和 DAE - 梯形法则
ode23tb	求解刚性微分方程 - 梯形法则 + 后向差分公式

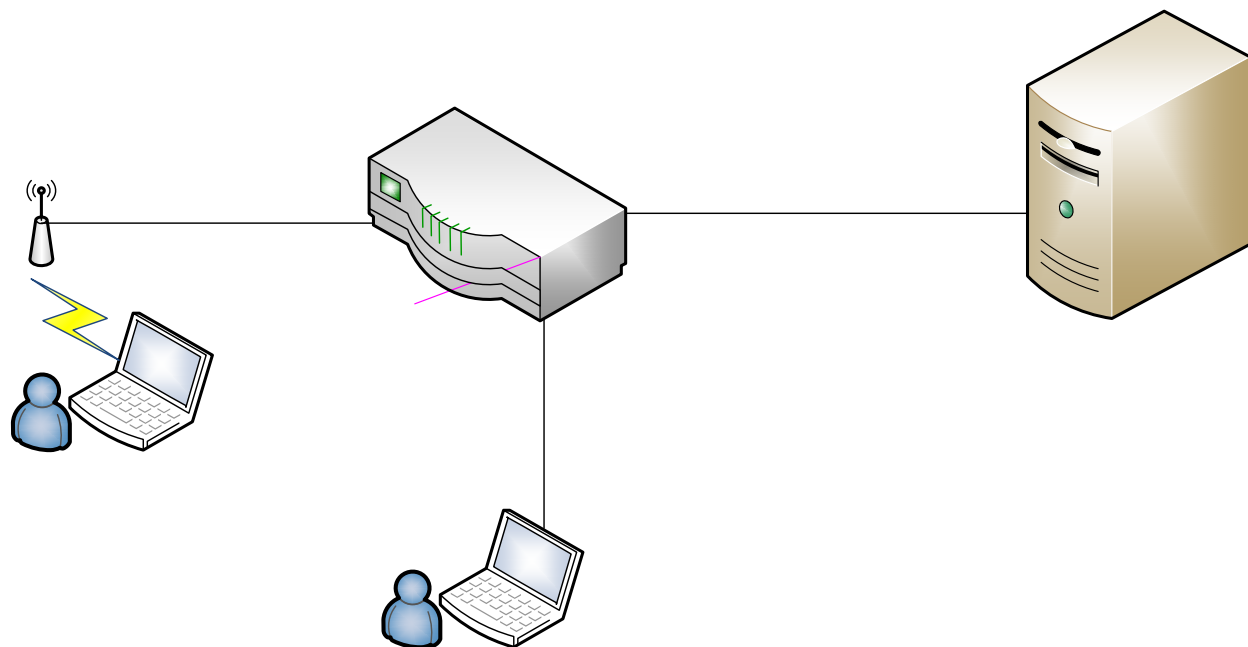
### 完全隐式求解器

ode15i	解算全隐式微分方程 - 变阶方法
decic	为 ode15i 计算一致的初始条件

# 连续系统仿真与离散事件系统仿真

## 离散事件系统

- **离散事件系统**：系统中的状态只是在**离散时间点**上发生变化，而且这些离散时间点一般是不确定的。
- **例子：上网浏览**
  - 开始上网的时间是随机的；
  - 网页浏览的时间长短是随机的；
  - 路由器的队列长度是随机的；
  - 服务器的忙闲状态是**随机的**；
  - 显然，这些状态量的变化只能在**离散的随机时间点**上发生。



## 离散事件系统仿真

➤ **离散事件系统**：系统中的状态变量只在某些离散的时间点上发生变化，也只有发生这些事件的时间点上系统的状态才会发生变化。针对这种系统模型的仿真称为**离散事件系统仿真**。

- **数学模型**：很难用统一的数学形式描述出来，常用各种接近自然语言的图、表等表示。
- **仿真模型**：不再是差分方程求解问题，往往需要在**统一的仿真时钟控制下**仿真不同事件的处理过程，跟踪系统状态的变化，得到相应的输出。



## 离散事件系统建模与仿真的特点

### ➤ 与连续系统相比

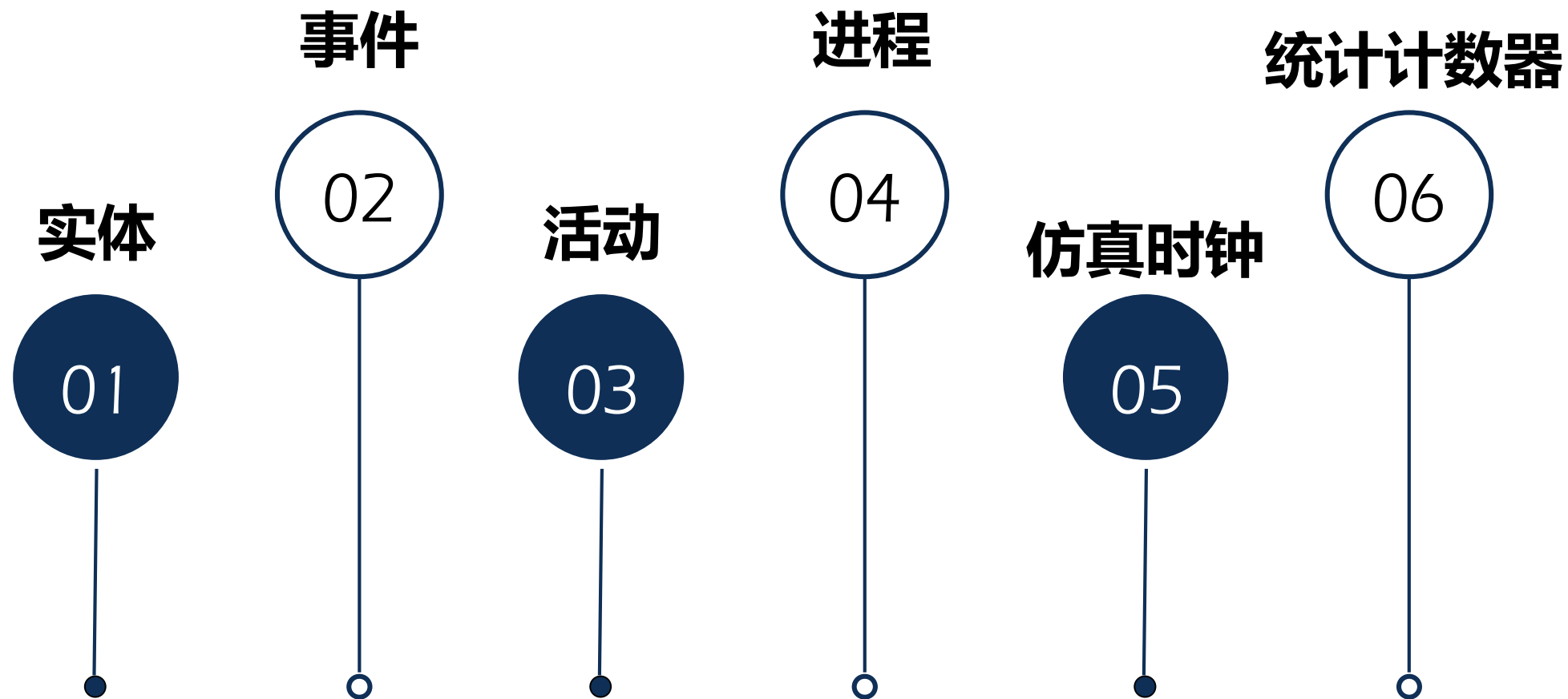
- **描述方式的特殊性**：系统的状态变化往往无法用数学公式表示，描述方式通常为图、表等接近自然语言的方式。
  - **动态性**：离散事件系统总是**动态变化**的，时间是仿真模型中的一个关键变量。
  - **随机性**：离散事件系统总是包含**排队过程**。
- 由于离散事件系统固有的随机性，对这类系统的研究往往十分困难；
- 经典的**概率及数理统计理论等学科**为研究这类系统提供了理论基础；
- 对现实中的大量系统，唯有依靠**计算机仿真技术**才能提供较为完整的结果。



2

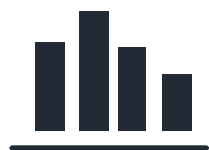
基本概念

# 基本概念



# 基本概念

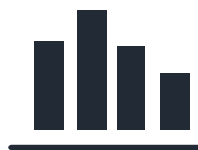
实体：在仿真中需要跟踪其行为的系统元素



## 临时实体

- 这类实体由系统外部到达系统，通过系统，最终离开系统。

临时实体按一定规律不断地到达(产生), 在永久实体约束下通过系统，最后离开系统，整个系统呈现出动态过程



## 永久实体

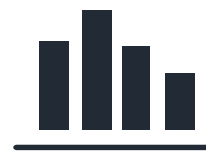
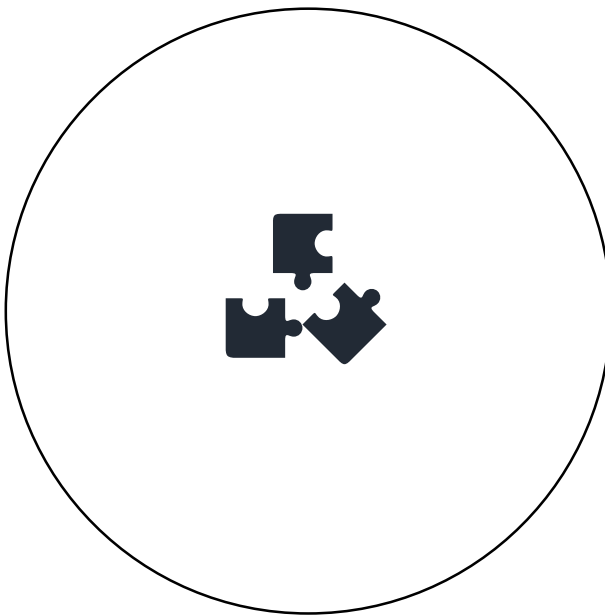
- 永久驻留在系统中的实体称为永久实体

## 主动实体和被动实体



### 主动实体

- 主动实体是那些可以主动产生活动的实体；
- 例如排队系统中的顾客，它的到达将产生排队活动或服务活动



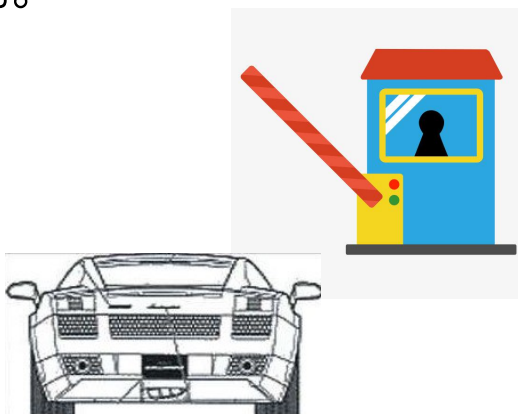
### 被动实体

- 被动实体本身不能激发活动，只能在主动成分作用下发生状态变化。
- 例如服务台，当顾客到了才会提供服务

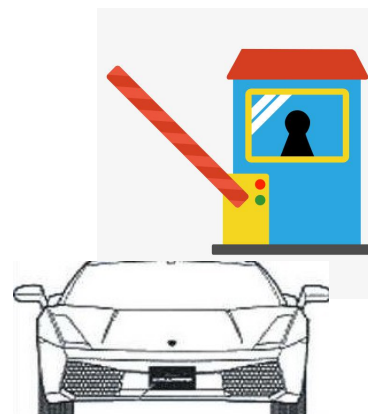
# 基本概念

## 事件

- 事件：引起系统状态发生变化的行为。
- 通常，离散事件系统是由事件来驱动的。
- 例如高速公路收费口：
  - 定义“车辆到达”为一类事件，因为由于车辆到达，系统的状态——收费员的“状态”可能从闲(如果无车排队)到忙。或者另一系统状态——排队的车辆数发生变化(队列车辆数加1)。
  - 定义“车辆离开”为一类事件，一辆车交费完毕后离开导致系统的状态——收费员的“状态”由忙变成闲。



到达



离开

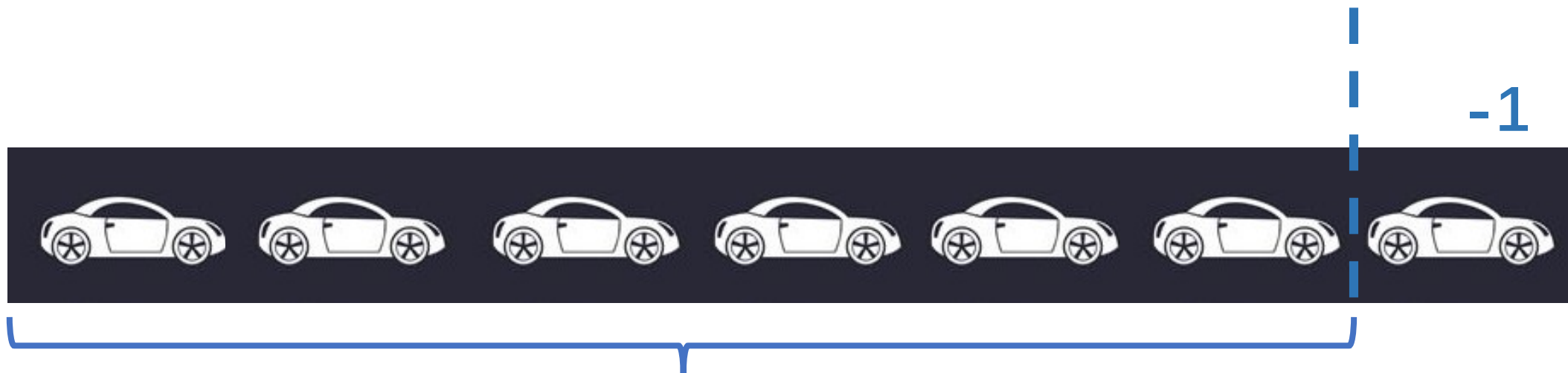
# 基本概念

## 活动

➤ 离散事件系统中的活动，通常用于表示两个可以区分的事件之间的过程，它标志着系统状态的转移。

➤ 例子：高速公路收费口

- 车辆的到达事件与该车辆开始接受收费服务事件之间可称为一个活动，即排队活动；
- 车辆开始接受收费到该车辆交费完毕后离去也可视为一个活动，即交费活动。



# 基本概念

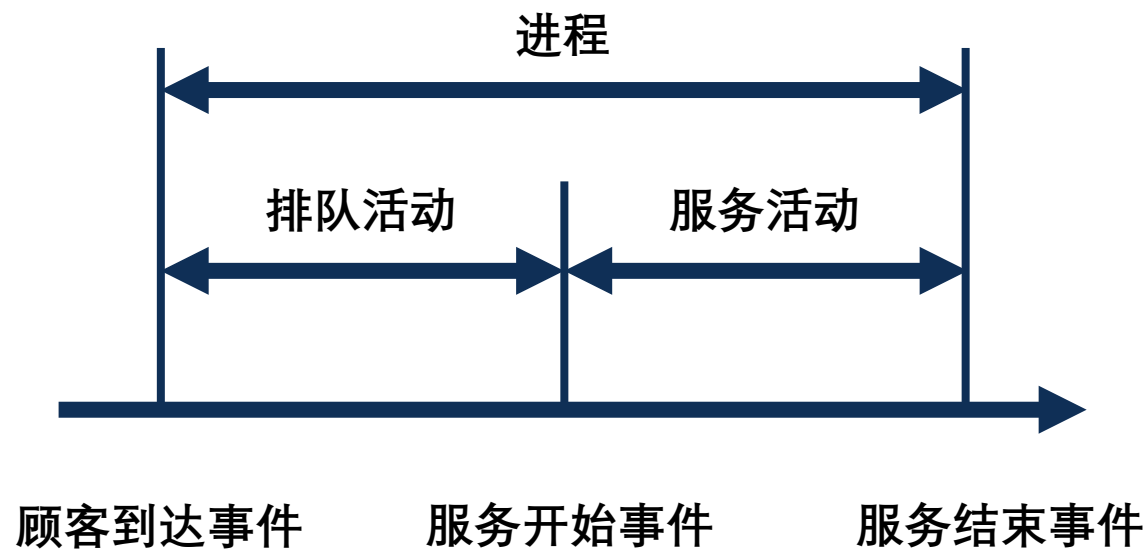
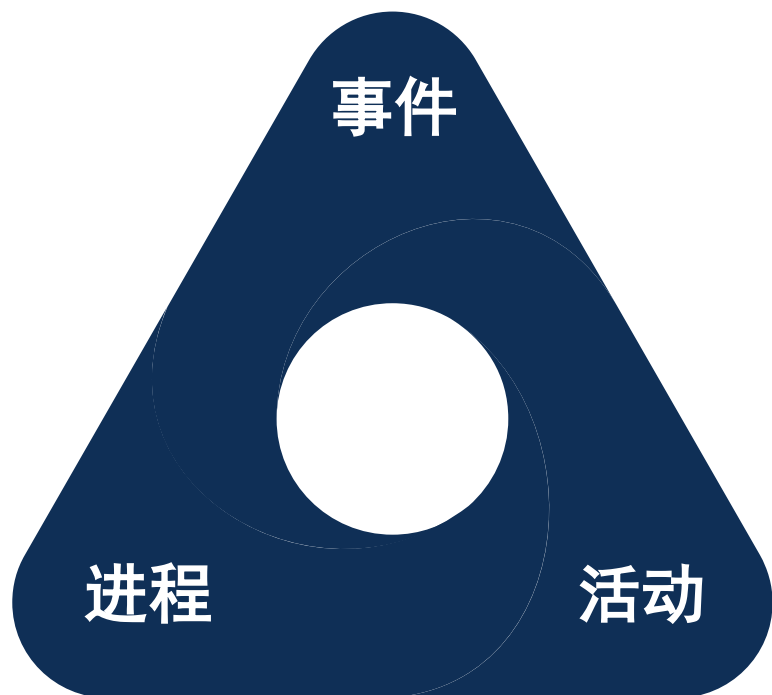
## 进程

- 进程：由若干个有序事件及若干个有序活动组成，一个进程描述了它所包括的事件及活动间的相互逻辑关系及时序关系。
- 例子：高速公路收费口
  - 一台车辆到达，经过排队、交费、直到交费完毕后离去可称为一个进程。
  - 经常用进程表示临时实体的整个或部分生命周期。



# 基本概念

## 事件、活动、进程三者关系



# 基本概念

## 仿真时钟

- 仿真时钟：**表示仿真时间的变化。**
- 与在连续系统仿真中不同，离散事件动态系统的状态就只在**离散时间点上发生变化**，因而不需要离散化处理。
- 由于引起状态变化的事件发生时间的随机性，仿真时钟的推进步长则完全是随机的。
- 如果两个相邻发生的事件之间系统状态不发生任何变化，则仿真时钟可以跨过这些“不活动”周期。
- 从一个事件发生时刻推进到下一事件发生时刻，仿真时钟的推进呈现跳跃性，推进速度具有随机性。
- 是**仿真的时间基础、仿真过程的推进器和驱动器。**

# 基本概念

## 统计计数器

- 离散事件系统仿真的结果只有在**统计意义下才有参考价值**
  - 由于变化是随机的，某一次仿真运行得到的状态变化过程只不过是随机过程的一次取样，若进行另一次，状态变化过程可能完全是另一种情况。
- 因此，离散事件系统仿真模型中，需要有一个**统计计数部件，以便统计系统中的有关变量。**



A diagram consisting of a large outer rectangle and a smaller inner rectangle, both with dark blue borders. The outer rectangle has solid dark blue squares at its top-left and bottom-right corners. The inner rectangle is centered within the outer one. Between the two rectangles, on the left and right sides, are dark blue arrowheads pointing towards each other. The number '3' is centered between the two rectangles, above the text '仿真策略'.

3

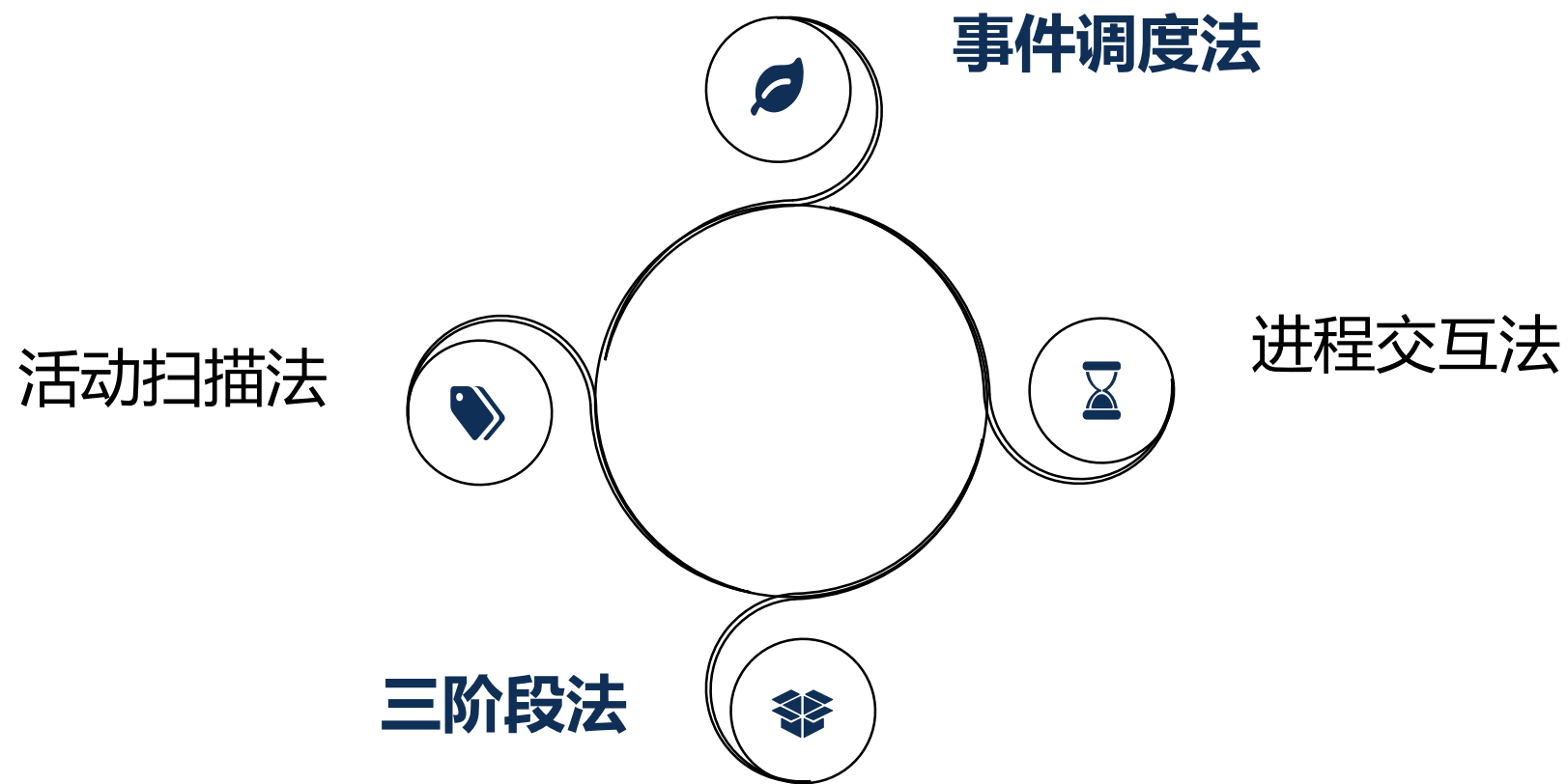
仿真策略

# 仿真策略

## 仿真策略的重要性

- 多个实体**相互联系、相互影响**，其活动的发生统一在同一个时间基上
- 仿真策略旨在：确定如何**推进仿真钟**，建立起各类实体、各个事件之间与真实系统相一致的逻辑关系
- 仿真策略意义：决定仿真模型的**结构**和**组织方式**，保证事件和活动正确的时间、按正确的顺序发生。

# 仿真策略



# 仿真策略

## 事件调度法

- 基本思想：用**事件的视角**来分析真实系统；
  - 定义**事件**以及每个事件发生所引起的**系统状态变化**；
  - 按事件发生时间先后顺序来**安排事件**，并处理每个事件发生时的有关**逻辑关系**。
  - 若按照这种策略建立模型时，所有的事件均放在**事件表**中。

## 仿真策略

### 事件调度法

- 模型中设有一个**时间控制组件**，它从事件表中选择具有**最早发生时间**的事件并将仿真钟修改到该事件发生的时间；
- 调用与该事件相应的事件处理模块；
- 该事件处理后返回时间控制组件。
- 事件的选择与处理不断进行，直到仿真终止条件或程序事件产生为止。



# 仿真策略

## 事件调度法

### 相关符号含义

- 实体：集合  $C = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $1 \leq i \leq n$ 
  - 主动实体：  $Ca = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$
  - 被动实体：  $Cp = \{a_1, a_2, \dots, a_L\}$
- 描述变量：对实体状态、属性的描述。
  - $S$  为所有实体的状态变量
  - $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ：参数（属性）集合
- $D_a(S)$  表示实体  $a$  在状态变量值为  $S$  时的条件是否满足
  - $= \text{true}$  时表示满足， $= \text{false}$  时表示不满足。
- $t_a$ ：实体仿真钟，指示实体  $a$  的状态下一发生变化的时刻
- $\text{TIME}$ ：系统仿真钟

### 流程

#### 执行初始化操作

置初始化时间、结束时间

事件表  $Ca$  初始化，置系统初始事件

状态初始化

#### 操作事件表

取出具有  $t(s) = \min \{t_a | a \text{ 属于 } Ca\}$  的事件记录

修改事件表

#### 推进仿真钟 $\text{TIME} = t(s)$

While( $\text{TIME} \leq t_\infty$ ), 则执行

Case 根据事件类型  $i$

$i=1$ , 执行第一类事件处理程序

$i=2$ , 执行第二类事件处理程序

.....

endcase

取出具有  $t(s) = \min \{t_a | a \text{ 属于 } Ca\}$  事件记录

置仿真时间  $\text{TIME} = t(s)$

endwhile

## 仿真策略

### 举例：单服务台排队系统的事件调度法仿真

- 系统状态：例如顾客排队的队长 $q$ ，服务员忙闲状态 $Z$
- 引起这些状态变化的事件有：顾客到达系统、顾客接受服务、顾客离开系统

事 件 类 型	事 件 描 述	属 性
第1类	顾客到达系统	到达时间
第2类	顾客接受服务	开始服务时间
第3类	顾客接受服务完毕，离开系统	离去时间

## 举例：单服务台排队系统的事件调度法

### ➤ 定义事件及相关属性

□  $t_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客到达类事件发生的时间

□  $b_i \rightarrow$  第 $i$ 个任何一类事件发生的时间

□  $A_i = t_i - t_{i-1} \rightarrow$  为第 $i-1$ 个顾客与第 $i$ 个顾客到达时间间隔

□  $D_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客排队等待的时间长度

□  $S_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客服务的时间长度

□  $C_i = t_i + D_i + S_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客离去的时间

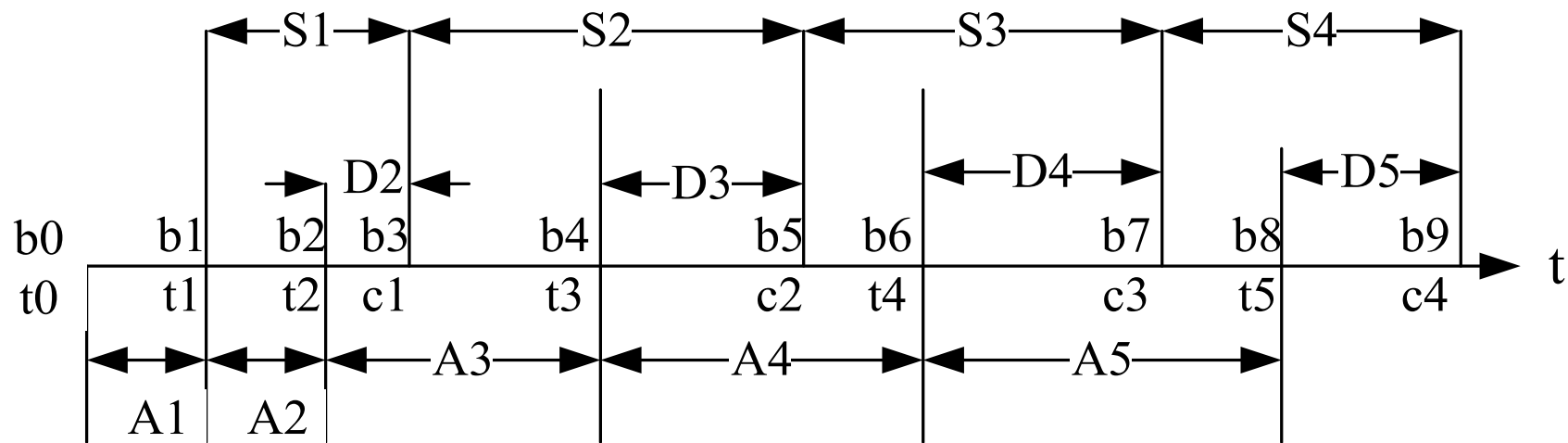
□  $Q_i \rightarrow$  第 $i$ 个事件发生时的队长

□  $Z_i \rightarrow$  第 $i$ 个事件发生时服务员的状态（1：忙；0：闲）

### ➤ 一般说来， $A_i$ 、 $S_i$ 是随机变量

# 仿真策略

## 举例：单服务台排队系统的事件调度法



仿真钟的推进过程

- $t_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客到达类事件发生的时间
- $b_i \rightarrow$  第 $i$ 个任何一类事件发生的时间
- $A_i \rightarrow$  为第 $i-1$ 个与第 $i$ 个顾客到达时间间隔
- $D_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客排队等待的时间长度
- $S_i \rightarrow$  第 $i$ 个顾客服务的时间长度

# 仿真策略

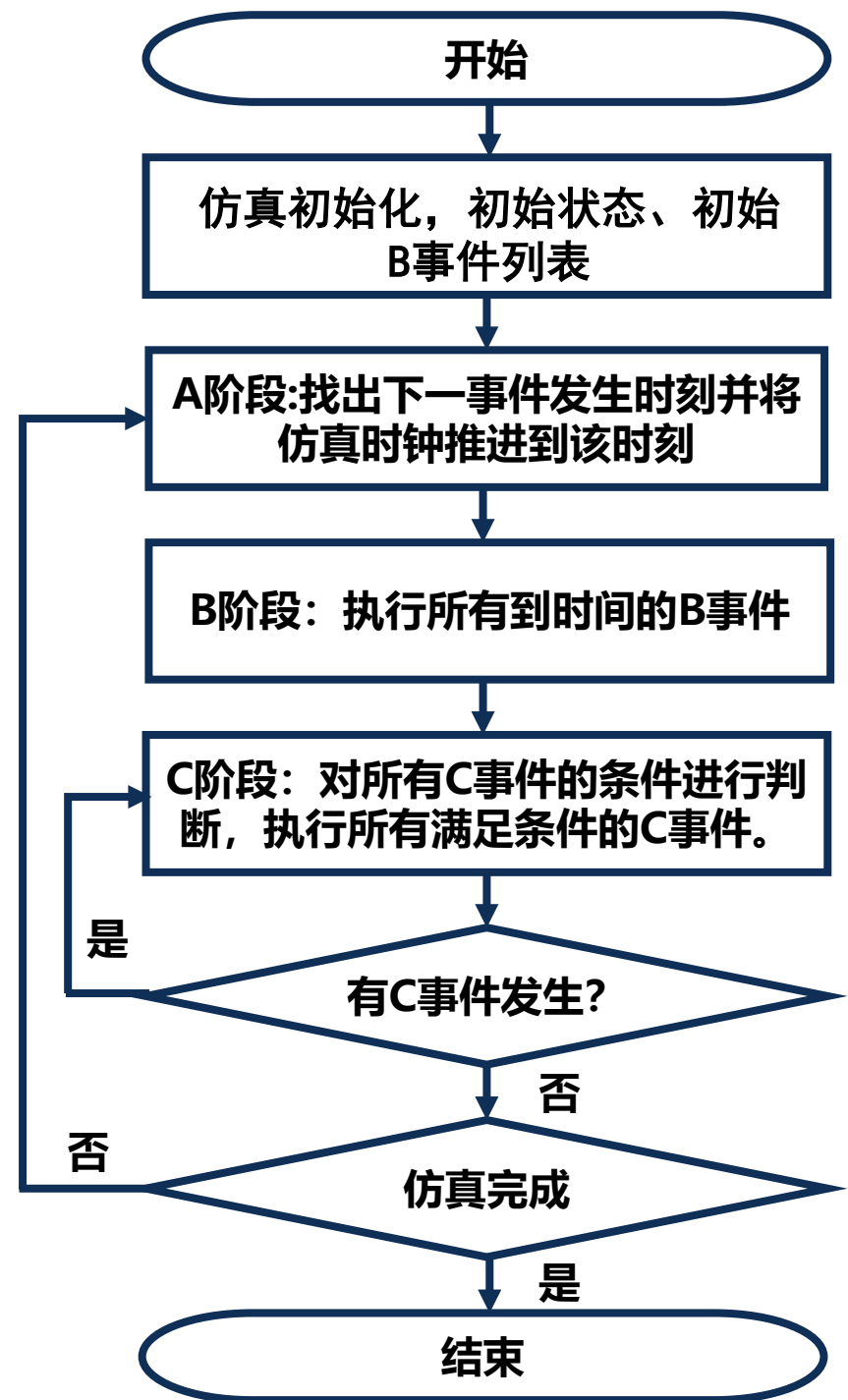
## 三阶段法

- 基本思想是将**无条件事件和有条件事件的处理相分离**，每一次修改仿真钟之后都会对两类事件分别进行处理。
- 两类事件：
  - B (bound 或者 booked) 事件
    - 发生时刻是**可预测**的，是**无条件**的
    - B事件通常是“到达”或“结束”类事件。
    - 如通信系统仿真中一次语音通话的发起与结束
  - C (conditional) 事件
    - 发生与否是**有条件**的，通常与时间没有直接关系
    - C事件通常与某活动是否开始相联系。
    - 如一次呼叫是否被服务就是典型的C事件

# 仿真策略

## 三阶段法

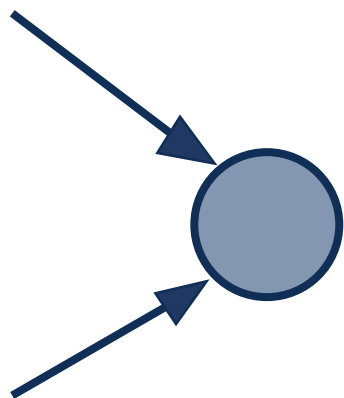
- 右图为三阶段法的处理过程
- 开始进入循环阶段之后，在仿真钟每发生一次改变都会分成三个阶段执行
  - **A阶段**：时间扫描。找出下一个最早发生的事件，将系统仿真钟推进到该事件的发生时刻。记录在该时刻要发生的B事件，形成一个B事件列表；
  - **B阶段**：执行B事件列表
  - **C阶段**：查询C事件表，逐一对事件表中的事件进行条件测试，若条件满足则执行相应的动作。



# 三阶段法实例

## 三阶段法

X类呼叫，周  
期为5mins

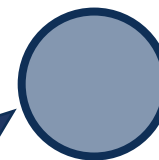


Y类呼叫，周  
期为10mins



处理时间1min

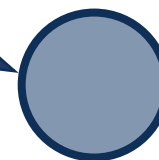
X



接线员1

处理时间4mins

Y



接线员2

处理时间7mins

## 三阶段法实例

### B事件

事件	类型	状态变化	规定的下一事件
B1	到达	X呼叫到达并进入路由队列	B1
B2	到达	Y呼叫到达并进入路由队列	B2
B3	完成动作	路由完成工作并输出X到接线员1队列，Y到接线员2队列	
B4	完成动作	接线员1完成工作（完成接线数加1）	
B5	完成动作	接线员2完成工作（完成接线数加1）	
B6	仿真结束		



## 三阶段法实例

### C事件

事件	类型	条件	状态改变	规定的下一个事件
C1	开始动作	电话在路由队列中并且路由空闲	路由把电话从路由队列中取出并开始工作	B3
C2	开始动作	电话在接线员1的队列中并且接线员1空闲	接线员1把电话从接线员1的队列中取出并开始工作	B4
C3	开始动作	电话在接线员2的队列中并且接线员2空闲	接线员2把电话从接线员2的队列中取出并开始工作	B5

# 三阶段法实例

t=0 (初始化)

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
初始化	空	空闲	空	空闲	空	空闲
B事件列表					输出结果	
事件	时间				工作完成	
B1	5				X	0
B2	10				Y	0
B6	19					

# 三阶段法实例

t=5

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	X1	空闲	空	空闲	空	空闲
C	空	X1	空	空闲	空	空闲
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B3	6				X	0
B2	10				Y	0
B1	10					
B6	19					

# 三阶段法实例

t=6

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	空	空闲	X1	空闲	空	空闲
C	空	空闲	空	X1	空	空闲
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B2	10				X	0
B1	10				Y	0
B4	10					
B6	19					

# 三阶段法实例

t=10

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	Y1,X2	空闲	空	空闲	空	空闲
C	X2	Y1	空	空闲	空	空闲
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B3	11				X	1
B1	15				Y	0
B6	19					
B2	20					

# 三阶段法实例

t=11

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	X2	空闲	空	空闲	Y1	空闲
C	空	X2	空	空闲	空	Y1
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B3	12				X	1
B1	15				Y	0
B4	16					
B5	18					
B6	19					
B2	20					

# 三阶段法实例

t=12

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	空	空闲	X2	空闲	空	Y1
C	空	空闲	空	X2	空	Y1
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B1	15				X	1
B4	16				Y	0
B5	18					
B6	19					
B2	20					

# 三阶段法实例

t=15

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	X3	空闲	空	X2	空	Y1
C	空	X3	空	X2	空	Y1
B事件列表						结果
事件	时间					工作完成
B4	16					X1
B3	16					Y0
B5	18					
B6	19					
B2	20					
B1	20					



# 三阶段法实例

t=16

模型状态						
阶段	路由队列	路由	接线员1队列	接线员1	接线员2队列	接线员2
B	空	空闲	X3	空闲	空	Y1
C	空	空闲	空	X3	空	Y1
B事件列表					结果	
事件	时间				工作完成	
B5	18				X	2
B6	19				Y	0
B2	20					
B1	20					
B4	20					



**THANKS FOR WATCHING**

