《计算机模拟》

第5讲－离散事件模拟

胡贤良

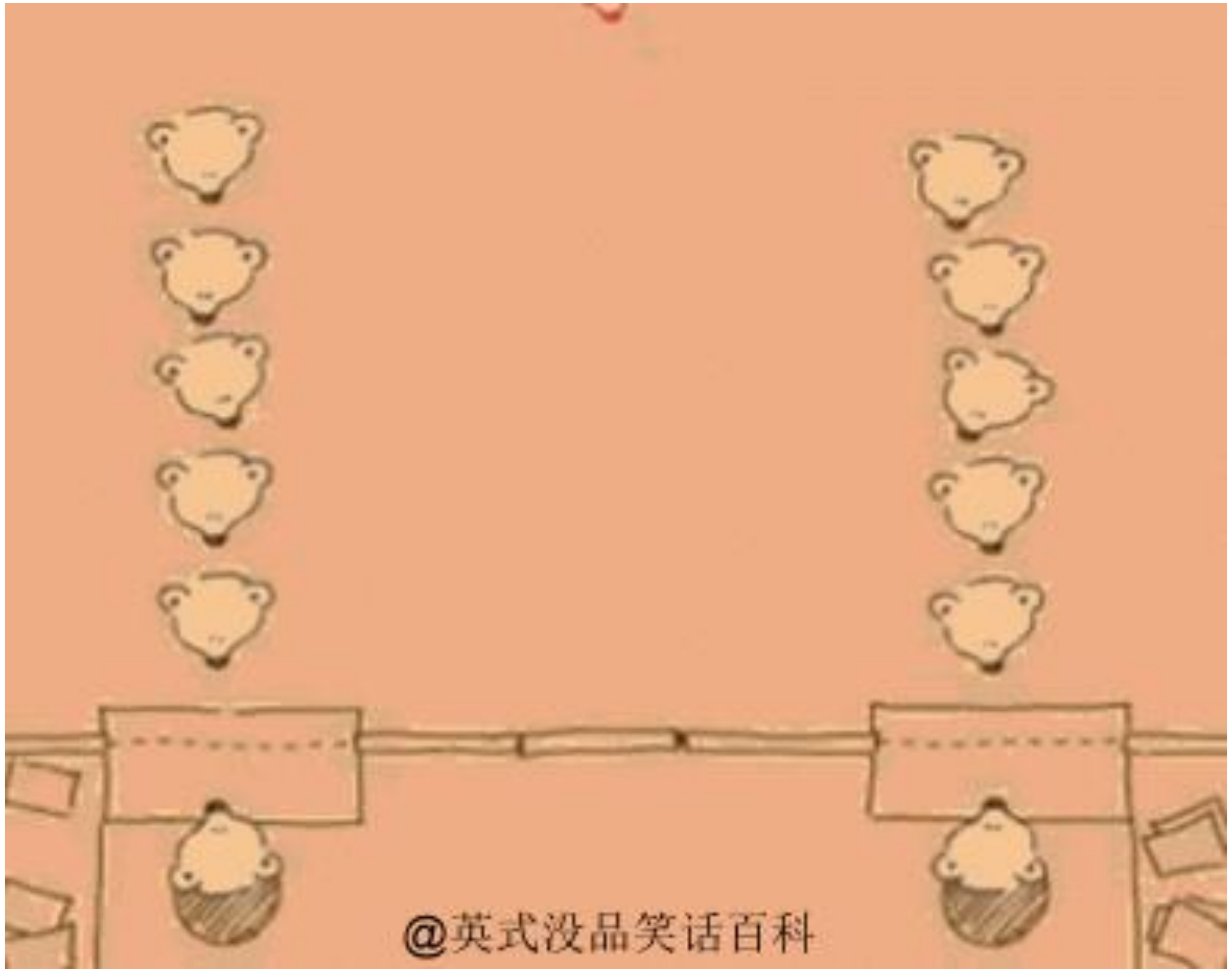
浙江大学数学科学学院

本讲内容

1. 离散事件系统

2. 排队论/排队模型

3. SimPy简介



1. 离散事件系统

离散型随机变量

应用：随机服务系统

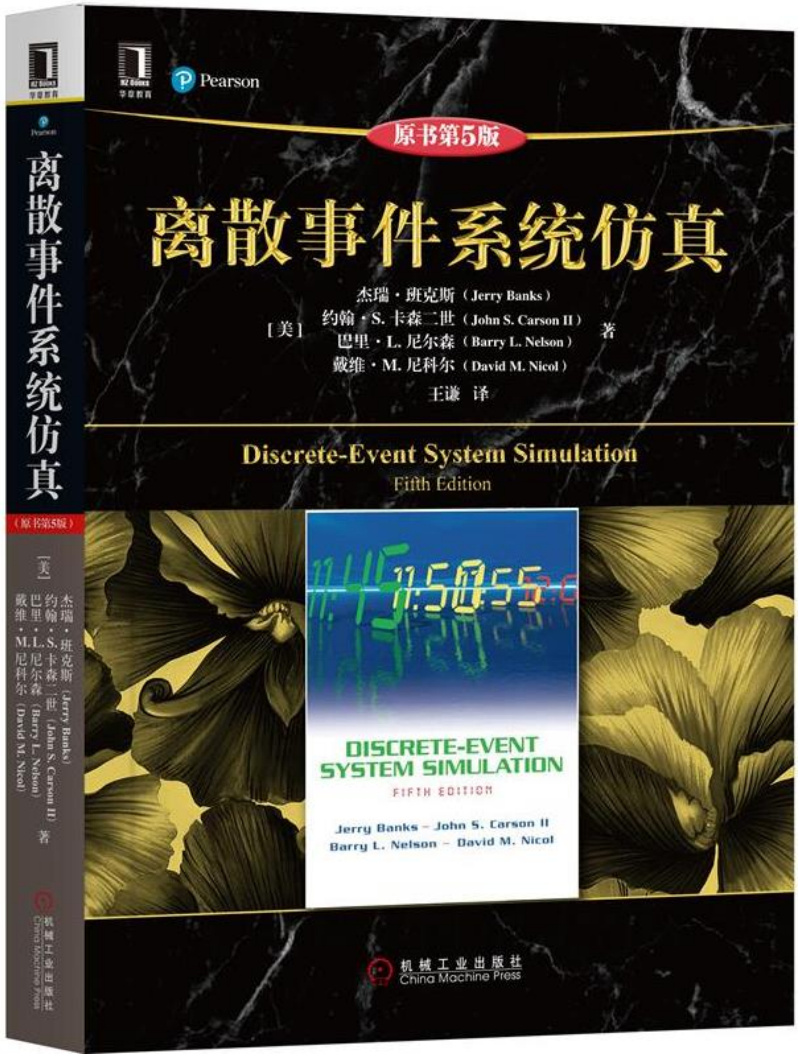
- 人们在日常生活中经常要服务系统打交道， 如：
  - 到商店购物有时需要排队、 患者到医院求诊常常要排队等待
  - 生产线上机床的启停、计算机系统中某项作业的进行和退出
  - 公路收费站、机场等交通枢纽，仓库模拟(车库/多层穿梭车系统)等

都可以归结为某种**随机服务系统**。

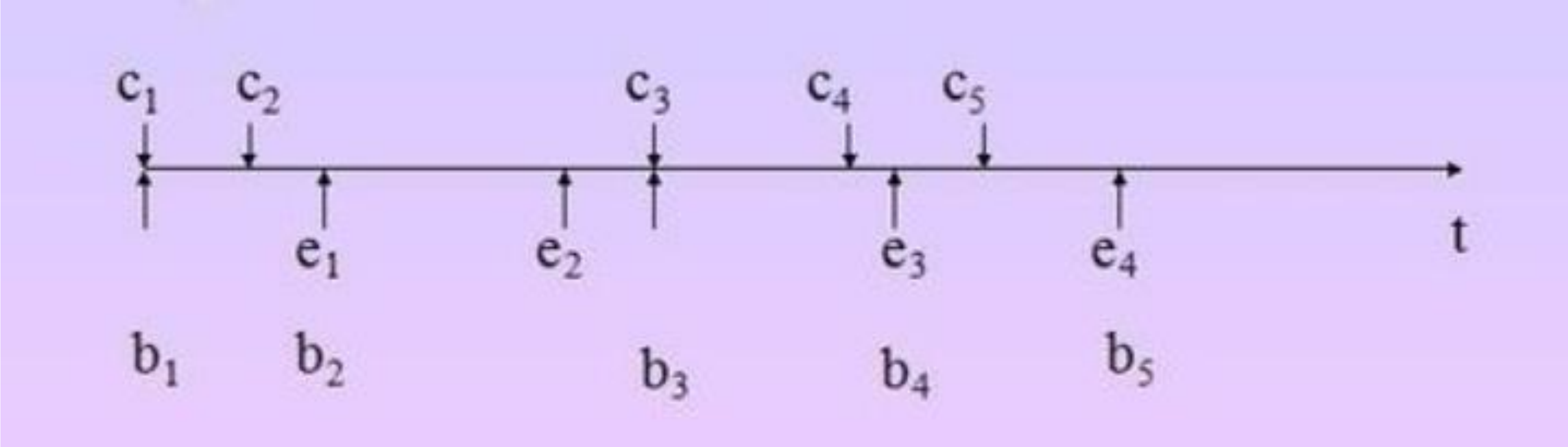
- 离散性：复杂的系统中有许多事件的启动和停止都发生在一些随机的时刻，具有离散的特征。因此也被称为离散事件系统
- 不确定性：服务系统不确定现象的随机源来自：

(1) 顾客的到达时间和数量的不确定；

(2) 顾客的服务时间通常也不确定。



离散事件系统典型案例



某银行有一个柜台，顾客陆续来到(come, c_i)，职员逐个地接(begin, b_i)待顾客。当到来的顾客较多时，一部分顾客便须排队等待，被接待后的顾客便离开(exit, e_i)商店。模拟系统的参数举例：

1. 顾客**到达间隔**时间服从参数为0.1的**指数分布**。
2. 对顾客的**服务时间**服从[4,15]上的**均匀分布**。

1）顾客到达(数)的分布

在随机服务系统中，顾客的到达过程常常被假设为一个泊松过程。设N(t)表示在时间区间$[0, t)$内到达的顾客数，以$P_n(t_1, t_2)$表示在时间区间$[t_1, t_2)$内有n个顾客到达的概率。所谓的**泊松过程**是指$P_n(t_1, t_2)$满足如下的泊松分布：

$$P_n(t_1, t_2) = P(N(t_2) - N(t_1) = n) = \frac{(\lambda(t_2 - t_1))^n}{n!} e^{-\lambda(t_2 - t_1)}, \quad n = 0,1,2, \dots, \quad (1)$$

并且对足够小的Δt,显然有

$$P_1(t, t + \Delta t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (2)$$

其中$\lambda > 0$是常数，它表示单位时间顾客的平均到达数。上式表明，在$[t, t + \Delta t)$内有一 个顾客到达的概率与t无关，而与Δt成正比。

泊松过程性质

- 平稳性：(1)式表明，$P_{\mathrm{n}}(t_1,t_2)$ 在$[t_1,t_2)$内有顾客到达的概率与t_1无关，仅与时间间隔(t_2-t_1)有关
- 马尔可夫性：各时间区间的顾客到达相互独立，即无后效性：

  过程在$t+\Delta t$所处的状态与t以前所处的状态无关，即对于$t_1<t_2<\cdots<t_{k-1}<t_k$,有

$$P(N(t_k)=n|N(t_1)=n_1,N(t_2)=n_2,N(t_{k-1})=n_{k-1})$$

$$=P(N(t_k)=n|N(t_{k-1})=n_{k-1})。$$

- 排斥性：对充分小的Δt,在时间区间$[t,t+\Delta t)$内有2个或2个以上顾客到达的概率是高阶无穷小，即

$$\sum_{n=2}^{\infty}P_n(t,t+\Delta t)=o(\Delta t),$$

因此可以**忽略**其发生。因为 $P_0+P_1+P_{\geq 2}=1$, 于是可知 在 $[t,t+\Delta t)$区间 内没有顾客到达的概率为:

$$P_0(t,t+\Delta t)=1-\lambda\Delta t+o(\Delta t)\approx 1-\lambda\Delta t\sim \mathrm{e}^{-\lambda\Delta t},\Delta t\to 0$$

若令$t_1=0,t_2=t$，则有$P_n(t_1,t_2)=P_n(0,t)=P_n(t)$。

2）两顾客到达时间间隔的概率分布

当输入过程是泊松过程时，设T为时间间隔，分布函数$F_T(t)$,则$F_T(t) = P(T \le t)$。此概率等价于在$[0,t)$区间内至少有1个顾客到达的概率。 由于没有顾客到达的概率为：$P_0(\mathrm{t}) = \mathrm{e}^{-\lambda t}$,则概率分布函数为

$$F_T(t) = 1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t},\ t > 0,$$

其概率密度函数为

$$f_T(t) = \frac{dF_T}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad ,t > 0$$

即T服从指数分布，它的期望及方差分别是：

$$E(T) = \frac{1}{\lambda} \quad ,var(T) = \frac{1}{\lambda^2}$$

这里,λ是前面的顾客在单位时间内的平均到达数,$\frac{1}{\lambda}$为平均间隔时间。因此，顾客到达的间隔时间T：

① **服从指数分布**，前后不同时间的顾客到达间隔时间是相互独立的.

② 服从指数分布 等价于 顾客的到达流服从泊松过程，且两者的参数相同!

3）服务时间的分布

- 对顾客的服务时间H是指系统处于忙期时两顾客相继离开系统的时间间隔，一般地，人们也假设它服从指数分布，即设它的概率密度函数为:

$$f_H(t) = \mu e^{\mu t}$$

其中，μ表示单位时间内被服务的顾客数，即平均服务率，$\frac{1}{\mu}$表示服务时间。

- 若要计算在 Δt时间内有一个顾客服务完毕和没有顾客服务完毕的概率，只需将参数λ换成μ即可。

- 进一步地，定义服务强度为

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

要求满足$\rho < 1$, 否则队列会无限长！

离散事件模拟 - 常见软件

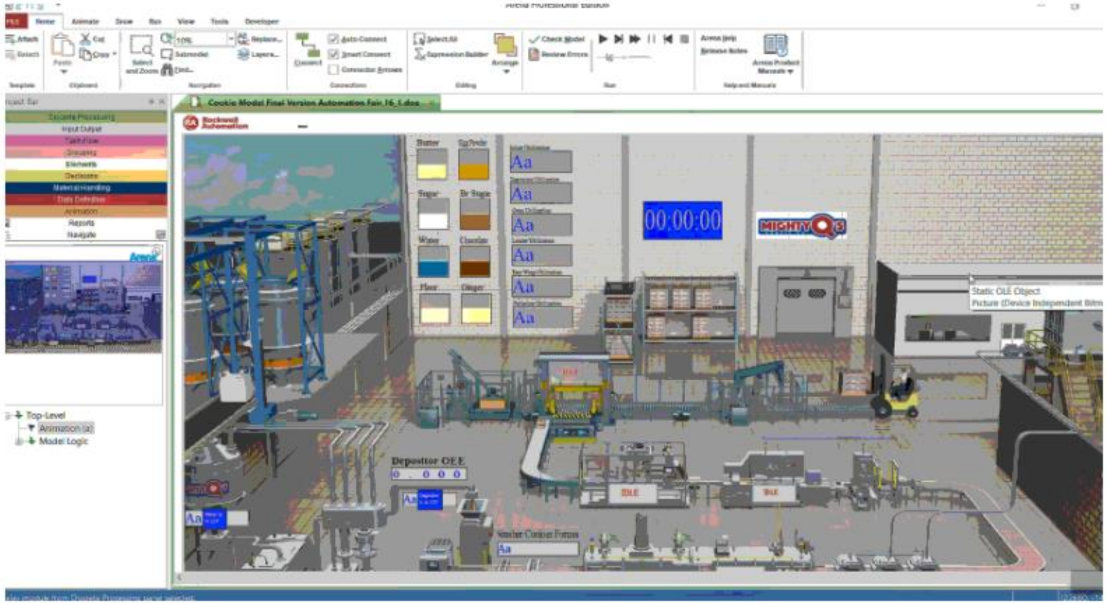
商业软件

名字	简介
Arena	能模拟离散事件、连续过程
ExtendSim	通用仿真软件包
FlexSim	离散事件模拟，3D
GoldSim	将动态离散事件模拟嵌入到 Monte Carlo 框架
Plant Simulation	模拟和优化生产系统和流程
SimEvents	MATLAB / Simulink环境
SIMUL8	基于对象的仿真软件

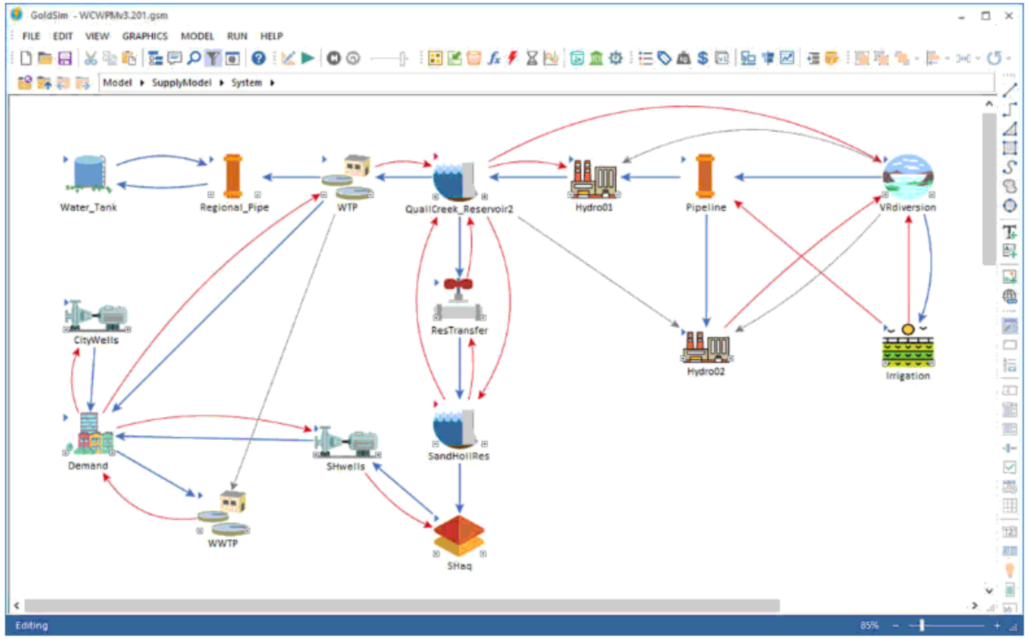
开源软件

名字	语言	License	简介
JaamSim	Java	Apasche 2.0	包括拖放式用户界面、交互式3D图形、输入和输出处理以及模型开发工具和编辑器
DESMO-J	Java	Apasche 2.0	支持混合事件/过程模型，提供2D/3D动画
Facsimile	Scala	LGPLv3	离散事件模拟/仿真库
SIM.JS	JavaScript	LGPL	在浏览器中运行，支持基于GUI建模
SimPy	Python	MIT	基于过程的离散事件模拟框架
北太天元	m脚本		国产工业软件
SystemC	C++	Apache 2.0	提供事件驱动模拟内核

Arena:

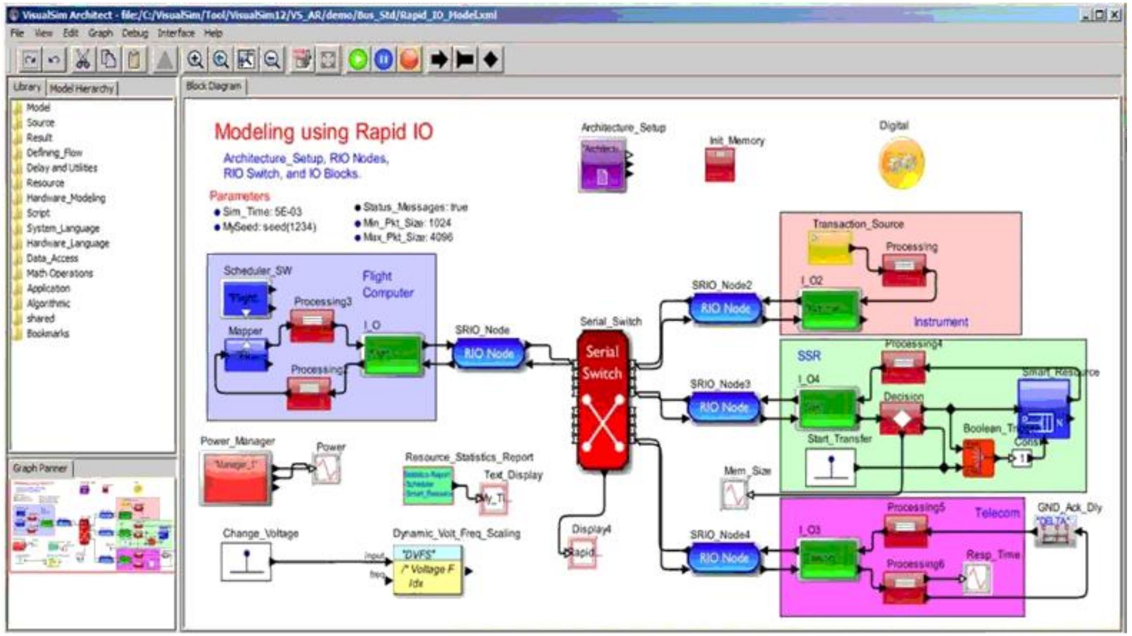


GoldSim:



FlexSim:

VisualSim:



2.排队论/排队模型

随机服务系统的三个基本组件

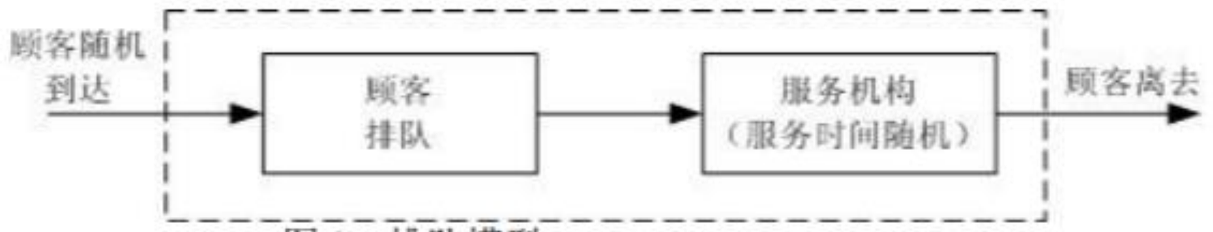


图1 排队模型

(1)输入过程

- 顾客的到达情况（顾客到达流），可分为下列几种情形：
  - 顾客源可能是有限的，也可能是无限的。
  - 顾客是成批到达，或是单个到达。
  - 顾客到达间隔时间可能是随机的，或确定的。
  - 顾客到达可能是相互独立，也可能是相关的。
  - 输入过程可能是平稳的，也可能是非平稳的。

(2)排队规则

- 顾客进入服务系统的等待方式，可分为**损失制**、**等待制**、**混合制**三类：
- (1)损失制：如果所有服务台都已被占用，自动离开系统。
- (2)等待制：即顾客加入排队行列等待服务。服务时遵循四种规则：
  - (a) 先到先服务(FCFS)，这是最常见的情形；
  - (b) 后到先服务(LCFS);
  - (c) 随机服务；
  - (d) 优先权服务。
- (3)混合制：等待制与损失制的结合规则，允许排队但不允许队列无限长。具体措施包括限制队长，限制等待时间或限制逗留时间等。

(3)服务机构

- 指服务系统的功能情况，通常关心的是服务时间，它可分为：
  - (1)服务机构可以是单个服务台或者由并列的多服务台组成；
  - (2)服务方式分为单个顾客服务和成批顾客服务；
  - (3)服务时间分为确定型和随机型，一般以随机型为多；
  - (4)服务时间的分布在这里通常被假定是平稳的。

排队论

➢ 随机服务系统的数学理论起源于1909年丹麦电话工程师爱尔朗(Agner Krarup Erlang)的工作，对当时**电话呼叫占线问题**进行了研究。

➢ 他的研究成果为运筹学分支—排队论奠定了基础该理论的**研究目标**就是既要保证系统服务质量指标较好， 又要使服务系统的成本费用经济合理。

➢主要研究内容：

1. **系统性态问题**：研究各种服务系统的概率特性（Poisson processes.pdf），如系统的队长分布、等待时间分布和忙期分布等，暂态和稳态等情形
2. **系统优化问题**：分为静态优化和动态优化，前者指系统的最优设计（如容量），后者指现有系统的最优运营（效率）

队列服务模型分类与记号

肯特尔(Kendall)给出了关于服务系统模型的分类及其记号，即

X/Y/Z/A/B/C

- X：顾客相继到达间隔时间分布， Y：一服务时间分布。 常见的情形有：
  - M——指数分布（泊松过程），这种输入过程属于马尔可夫过程；
  - D——确定性情形；
  - E_k——k阶爱尔朗分布；
  - GI——一般相互独立随机分布；
  - G——一般随机分布
- Z：并列的服务台数；
- A：排队系统的最大容量；
- B：顾客源数量；
- C：排队规则，如先到先服务（FCI

可约定：

1） 如略去记号后面的三项，即指：X/Y/Z/∞/∞/FCFS

2） M/M/1/∞/∞/FCFS可简写为M/M/L

随机服务系统的基本模型

●对于一个实际的随机服务系统问题，我们一般需要做如下两项工作：

(1)确定或拟合系统中顾客到达的时间间隔分布（到达流的分布）和服务时间分布；

(2)研究系统状态的概率特性，评估服务系统的性能指标。系统状态是指系统中顾客数n, 状态概率用$P_n(t)$表示，即在t时刻，系统中有n个顾客 的概率，也称暂态概率。

●求解状态概率$P_n(t)$的方法是建立含$P_n(t)$的微分差分方程，通过求解微分差分方程得到系统的暂态解。由于暂态解一般来说难以被用来评估系统的性能状况，因此常常使用它的极限（如果存在的话）情况，即稳态解：

$$\lim_{t\to\infty} P_n(t) = p_n$$

●根据稳态解来判断系统运行性能的优劣。

衡量系统运行特性的数量指标

(1) 平均顾客数L_s: 系统中的顾客数；

(2) 平均队列长L_q: 系统中排队等待服务的顾客数；

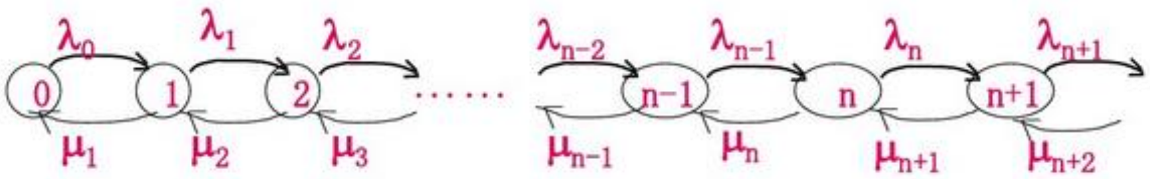
(3) 平均**逗留时间**W_s: 一个顾客在系统中的停留时间；

(4) 平均**等待时间**W_q: 一个顾客在系统中排队等待的时间；

(5) 平均**忙期**T_b: 服务机构连续繁忙时间，即从顾客到达空闲服务机构起到服务机构再次为空闲这段时间长度。

(逗留时间) = (等待时间) + (服务时间)

M/M/1模型



已知顾客到达服从参数为λ的泊松过程，服务时间服从参数为μ的指数分布。现仍然通过研究区间 $[t, t+\Delta t)$的状态变化来求解。在时刻$t+\Delta t$,系统中有n个顾客有以下四种情况（由排斥性，不考虑在时期 $[t, t+\Delta t)$内有 2个及以上顾客的同时到达或同时离开）

情况	时期$[t, t+\Delta t)$内顾客数的变化	时期$[t, t+\Delta t)$内顾客数的变化		转移概率$P_n(t, t+\Delta t)$
		到达	离去	
A	n → n	×	×	$(1-\lambda\Delta t)(1-\mu\Delta t)$
B	n+1 → n	×	√	$(1-\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$
C	n-1 → n	√	×	$(\lambda\Delta t)(1-\mu\Delta t)$
D	n → n	√	√	$(\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$

上述四种情况互不相容，所以：

$$\begin{aligned}&P_n(t+\Delta t)\\&=P_n(t)(1-\lambda\Delta t)(1-\mu\Delta t)+P_{n+1}(t)(1-\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)+P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t)(1-\mu\Delta t)+P_n(t)(\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)+o(\Delta t)\\&=P_n(t)(1-\lambda\Delta t-\mu\Delta t)+P_{n+1}(t)(\mu\Delta t)+P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t)+o(\Delta t)\end{aligned}$$

当Δt足够小时第四种情况可以忽略，故有：

$$\frac{P_n(t+\Delta t)-P_n(t)}{\Delta t}=\lambda P_{n-1}(t)-(\lambda+\mu)P_n(t)+\mu P_{n+1}(t)+\frac{o(\Delta t)}{\Delta t}$$

令$\Delta t\to 0$,得到关于$P_{\mathrm{n}}(t)$的微分方程：

$$\frac{dP_n(t)}{\mathrm{dt}}=\lambda P_{n-1}(t)-(\lambda+\mu)P_n(t)+\mu P_{n+1}(t) \qquad (5.1)$$

当$n=0$时，只考虑在t时刻时有1或0个顾客时的情况，且0个顾客时离去情况不考虑:

$$P_0(t+\Delta t)=P_0(t)(1-\lambda\Delta t)+P_1(t)(1-\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$$

故得：

$$\frac{dP_0(t)}{dt}=-\lambda P_0(t)+\mu P_1(t) \qquad (5.2)$$

上式（5.1）和（5.2）都是暂态解，我们要对$P_n(t)$取极限求其稳态解。其与时间无关，可简写成P_n。它对时间的导数为零，所以（5.1）及（5.2）可写成：

$$\lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1} - (\lambda + \mu) P_n = 0 \qquad (5.3)$$

$$-\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \qquad (5.4)$$

上式还可以写为：$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0 = \rho P_0$，

ρ为服务强度。所以我们可以得到稳定分布的递推式，依次计算各个P_n:

$$P_2 = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\lambda(\lambda+\mu)}{\mu} - \lambda\right) P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 P_0 = \rho^2 P_0$$

$$P_3 = \frac{1}{\mu}[(\lambda+\mu)\rho^2 - \lambda\rho] P_0 = \frac{\lambda}{\mu}\rho^2 P_0 = \rho^3 P_0$$

$$\cdots$$

$$P_n = \rho^n P_0 \qquad (5.5)$$

这里必须要求条件：$\rho < 1$. 由$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$得：

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \rho^n\right) P_0 = \frac{1}{1-\rho} P_0 = 1, \text{即} P_0 = 1 - \rho$$

因此得到系统的稳态概率：

$$P_n = (1-\rho)\rho^n \qquad (5.6)$$

系统运行指标的计算公式

1) 系统中的平均顾客数L_s:

$$L_s = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=0}^{\infty} n(1-\rho)\rho^n = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda/\mu}{1-\lambda/\mu} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda}$$

故，有：

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu-\lambda}$$

2) 队列中等待的平均顾客数L_q:

$$L_q = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)P_n = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)(1-\rho)\rho^n = \frac{\rho\lambda}{\mu-\lambda}$$

系统运行指标的计算公式

3) 顾客在系统中的平均逗留时间W_s

顾客在系统中的都是时间是满足参数为$\mu-\lambda$的指数分布的随机变量，其概率密度函数为：

$$f(w)=(\mu-\lambda)e^{-(\mu-\lambda)w}$$

所以：

$$W_s=\frac{1}{\mu-\lambda}$$

由此得，在L_s与W_s之间存在关系式：$L_s=\lambda W_s$

4) 平均等待时间W_q

W_q可由平均逗留时间W_s减去平均服务时间得到，即：

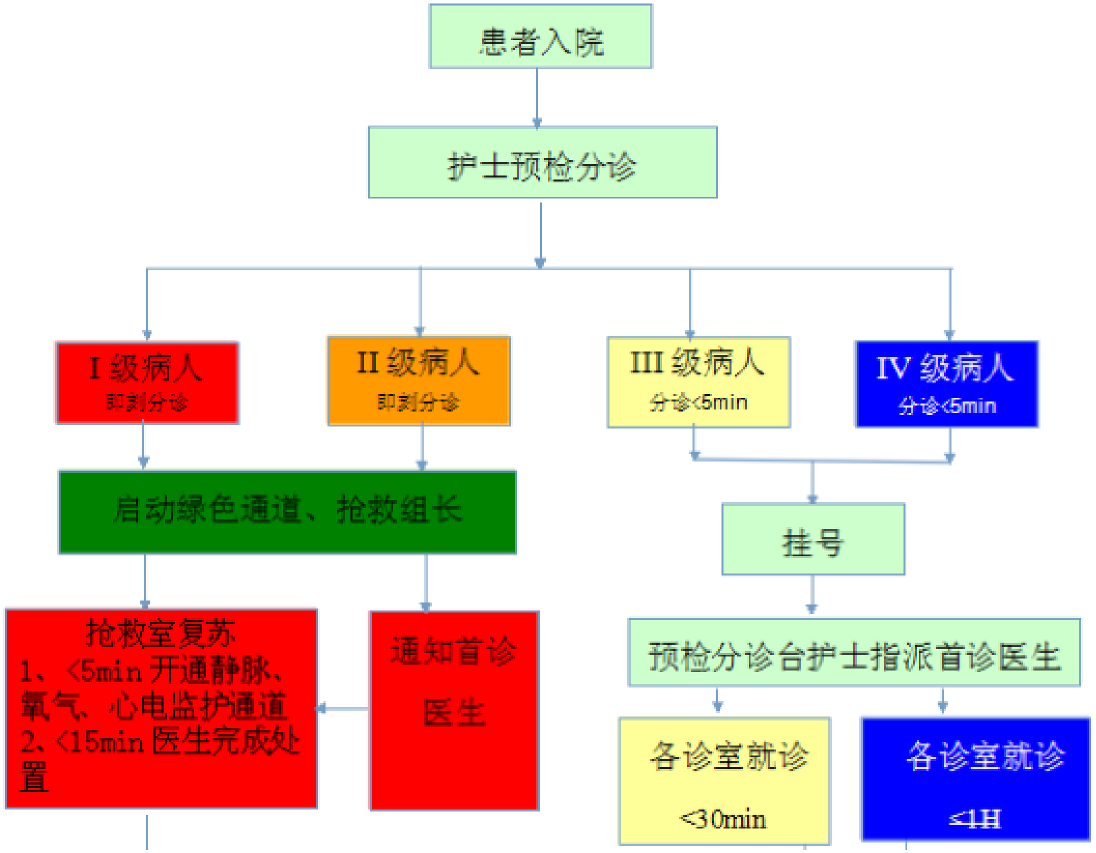
$$W_q=W_s-\frac{1}{\mu}=\frac{1}{\mu-\lambda}-\frac{1}{\mu}=\frac{\rho}{\mu-\lambda}$$

同样，在L_q与W_q之间存在关系式：$L_q=\lambda W_q$。

案例1 :医院预检处(M/M/1/N型服务系统)

➢随着计算机的普及，医院会在接待大厅设置计算机自助挂号的触摸屏来取代人工接待，患者或访客要使用计算机提供的导航信息为自己挂号。

➢但有些患者或访客可能不会操作或因不熟练的操作而引起耽误，所以往往会因此出现排队现象。



M/M/1型的随机服务系统

假设预检系统的到达流的分布特性不随时间变化而改变，则可以近似地假设这个系统是一种M/M/1型的随机服务系统。于是，我们假设:

- 客户到达率服从均值为λ的泊松分布；
- 服务时间也是相互独立同分布的随机变量，服从其均值为 τ的指数分布。

这种M/M/1模型在数学上是非常容易处理的，我们将通过本例来说明随机模拟的重要作用。

林德利(Lindley)方程

假设 $A_1, A_2, \dots$ 是顾客到达的间隔时间均值为$\frac{1}{\lambda}$的独立同分布的随机变量序列（其中A_1是每天第一个客户到达的实际时间）；类似地，令$X_1, X_2, \dots$是顾客的服务时间序列，它们是均值为 τ 且标准差为 σ 的独立同分布的随机变量；令$Y_1, Y_2, \dots$是顾客在排队预检时的等待时间序列，有

$$Y_i = \max\{0, Y_{i-1} + X_{i-1} - A_i\},\ i = 1,2,\dots \qquad (7.1)$$

这里我们规定 $Y_0 = X_0 = 0$。 这个递归式 (7.1) 被称为**林德利(Lindley)方程**，人们可以用它来方便地模拟这种M/M/1型系统的运行情况，并且可以通过统计重复多次的模拟结果来为改进预检系统提供一些相应的建议。

采用Matlab模拟随机服务系统。系统的状态（顾客数）是随着各个事件的发生而变化的，其中影响系统状态的事件有：顾客的到达、服务完毕的顾客的离去。为此，我们要记录每个顾客的全部有关信息。这样，我们建立个5行多列的矩阵（数组）变量guests来记录这些信息。这个矩阵的各列对应于依时间先后顺序到达的各个顾客；矩阵的各行分别表示顾客的各个主要信息变量：

第1行：顾客的到达时刻；

第2行：顾客的服务时间；

第3行：顾客的逗留时间；

第4行：顾客的离开时刻；

第5行：顾客的附加信息（可选）

```
guests=zeros(5,arr_num);%定义顾客信息的
%按指数分布产生各顾客到达的时间间隔
guests(1,:)=exprnd(arr_mean,1,arr_num);
%各顾客的到达时刻等于时间间隔的累计和
guests(1,:)=cumsum(guests(1,:));
%按指数分布产生各顾客服务时间
guests(2,:)=exprnd(ser_mean,1,arr_num);
%计算模拟的顾客个数，即到达时刻在模拟时
len_sim=sum(guests(1,:)<=Total_time);
%**********************************
%初始化第1个顾客的信息
%**********************************
guests(3,1)=0;%第1个顾客进入系统后直接
%其离开时刻等于其到达时刻与服务时刻之和
guests(4,1)=guests(1,1)+guests(2,1);
guests(5,1)=0;%此时系统内没有其他顾客，
```

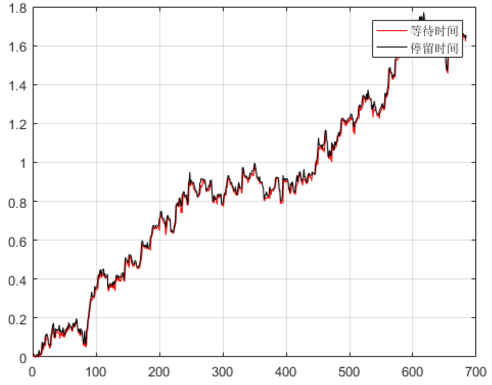
算例(line_1.m)

假设医院门诊每天营业10个小时， 选择小 时作为单位时间。从历史数据估计得医院患者或访客的到达率65（人/小时），服务率60（人/小时）。虽然没有容量的限制，但由于每天有营业时间，所以每天患者或访客的总数量是有限的。我们可以用下面公式来估算每天可能的最大顾客数：

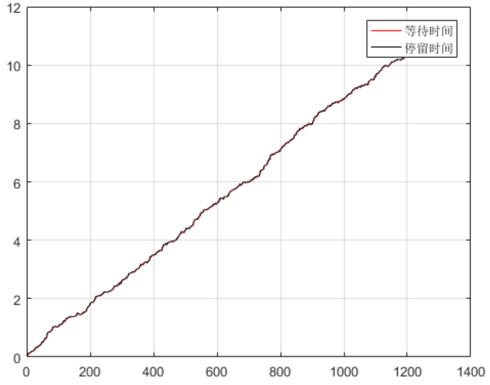
最大顾客数 ＝ 总时间 x 到达率 x 2

这样我们就不需要采用动态数组。另外，我们将 顾客数组中附加信息的那行用来记录当前顾客进入系统时，系统中存在的顾客数。

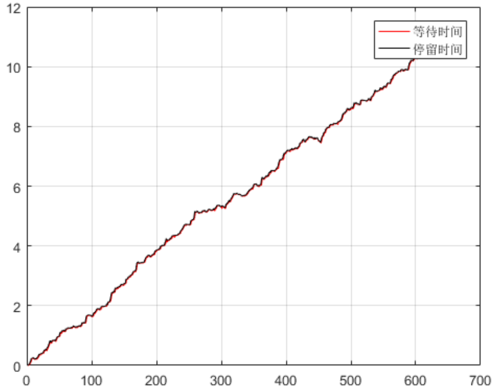
模拟结果：



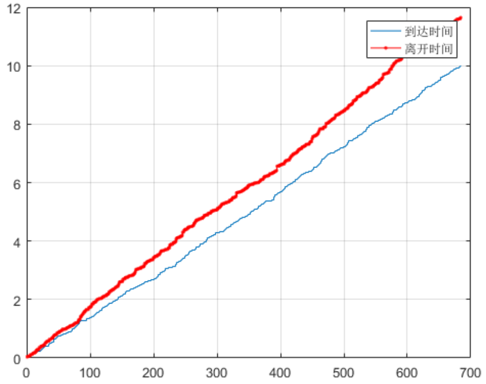
(1)到达率为65，服务率为60时的等待-停留时间图



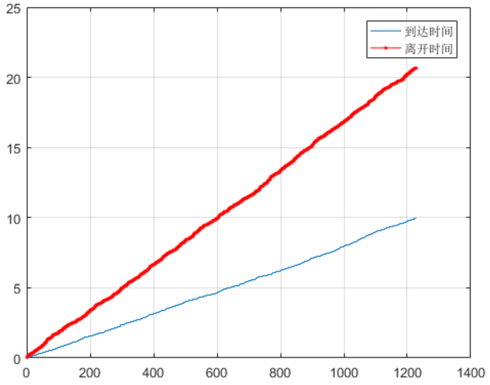
(3)到达率为130，服务率为60时的等待-停留时间图



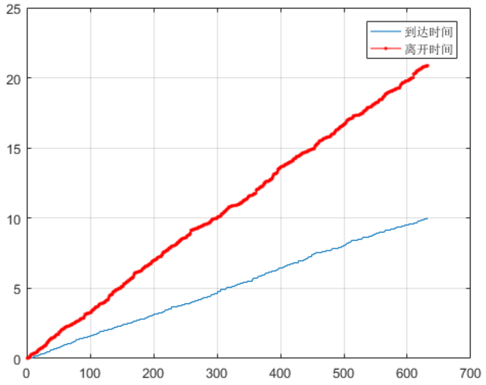
(5)到达率为65，服务率为30时的等待-停留时间图



(2)到达率为65，服务率为60时的到达-离开时间图



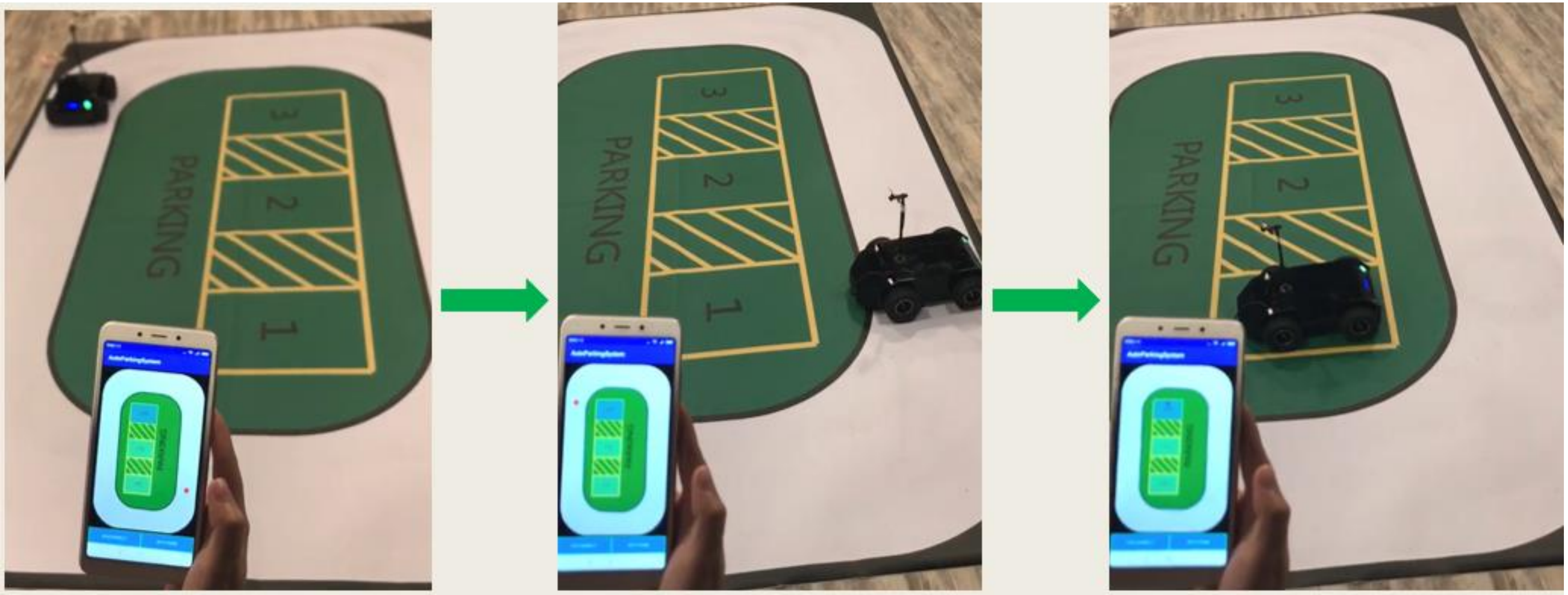
(4)到达率为130，服务率为60时的到达-离开时间图



(6)到达率为65，服务率为30时的到达-离开时间图

案例2：停车库问题(M(t)/M/∞型)

建设一个大型商业中心的设计者必须决定建设多大容量的地下停车库。已知每天车的到达率将是随时间而变化的，每天在变化，甚至每小时都在变化。一些顾客光顾商场可能很短的时间，而有些顾客可能光顾一整天。一旦车库建成后，商业中心可以根据负载量开放或关闭一些停车区域。但是首要问题是，停车库的最大**容量应该为多大**?



M(t)/M/∞型的随机服务系统(line_2.m)

假设停车库是每天连续24 小时营业，时间单位是小时，即T = 24。从已收集到的类似地方的停车库的数据中,人们估计出该停车库车辆的最大**到达率**为65 （车/小时）,其**波动幅度**约为20 （车/小时）， 而**服务率**为60（车/小时）。我们以每天的营业时间作为一个周期来模拟每天的停车情况， 所以同上例一样，每天的车辆总数也是有限的。我们可以用同样的公式来估算每天可能的最大车辆数。在这个问题中，并列的服务台个数是无穷多的。与上面例子的不同之处还在于，车辆到达流是非平稳的泊松过程。考虑到每天车辆活动的周期性， 假设每天车辆的到达率呈周期性变化，即：

$$\lambda(t) = (\lambda_{max} - a) + a\sin(2\pi t/T) \quad (7.2)$$

其中 $\lambda_{max} = \max_t \lambda(t)$是可能的最大到达率，a是到达率的波动幅度(0≤a≤ λ_{max})。

到达时间序列

为了能生成服从非平稳泊松过程的随机序列，我们用**拒绝法**来生成**到达时间序列**:

for n=1,2,…

生成$\tilde{d}_n \sim E(\lambda_{max})$

$\tilde{t}_n \leftarrow \tilde{t}_{n-1} + \tilde{d}_n$

生成随机数$rand \sim U(0,1)$

if $rand \leq \lambda(\tilde{t}_n)/\lambda_{max}$ then

$t_k \leftarrow \tilde{t}_n$

$d_k \leftarrow t_k - t_{k-1}$

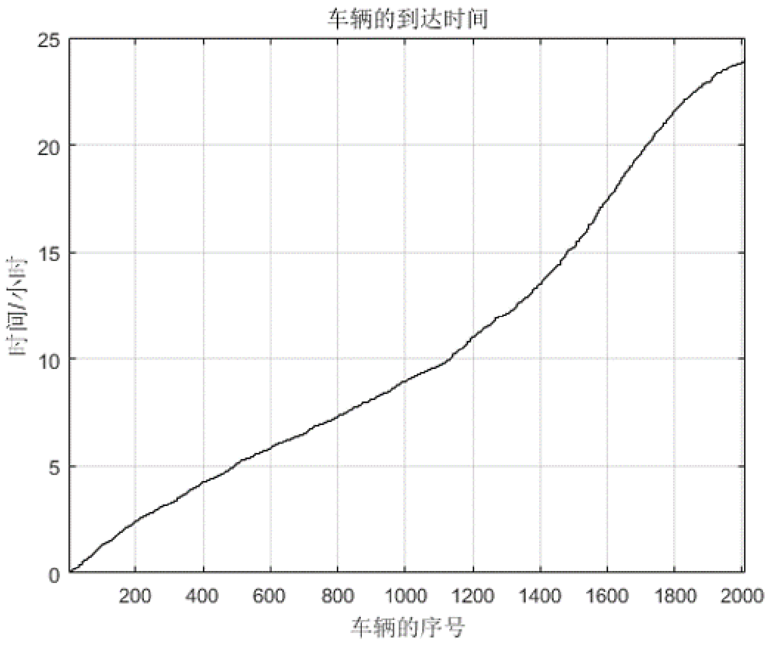
$k \leftarrow k + 1$

end if

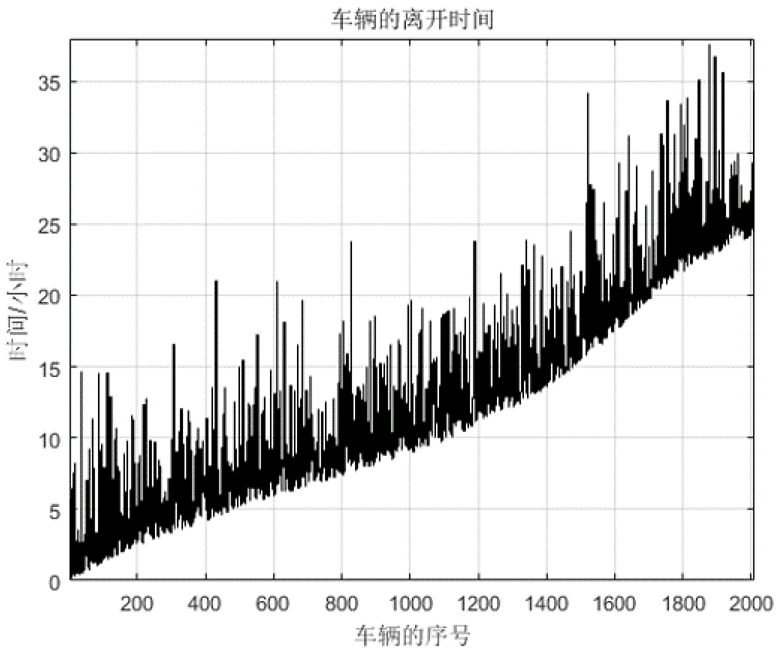
end for

在这样生成的时间间隔的随机序列$\{d_k\}$过程中，有一定比例的随机数被拒绝掉了。

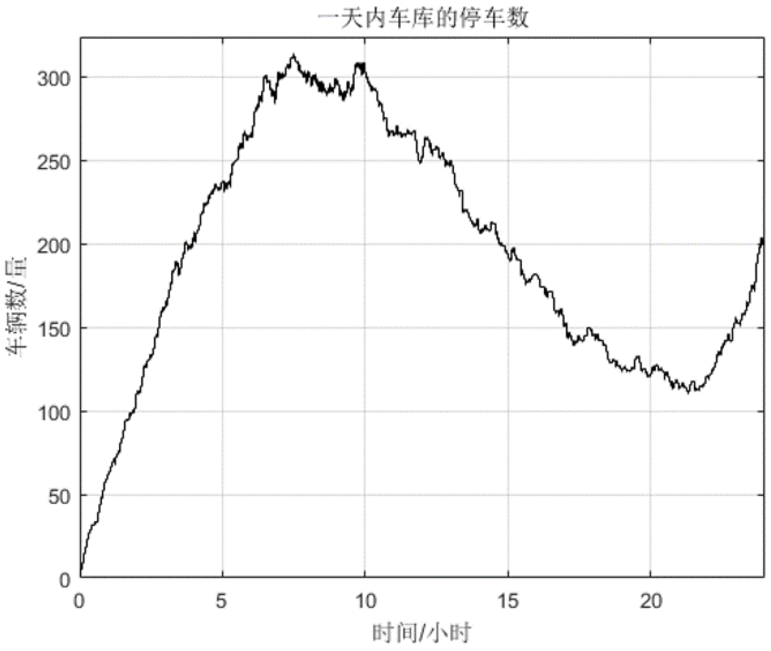
模拟结果(一)



(7)车辆的到达时间

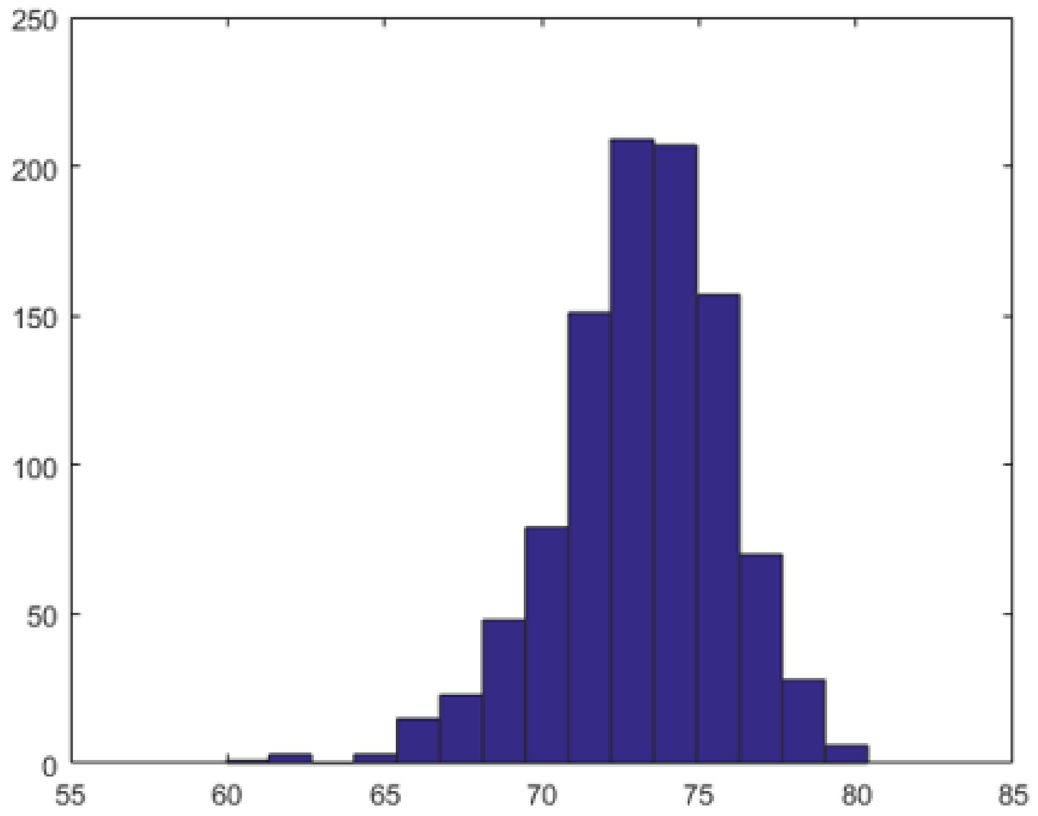


(8)车辆的离开时间

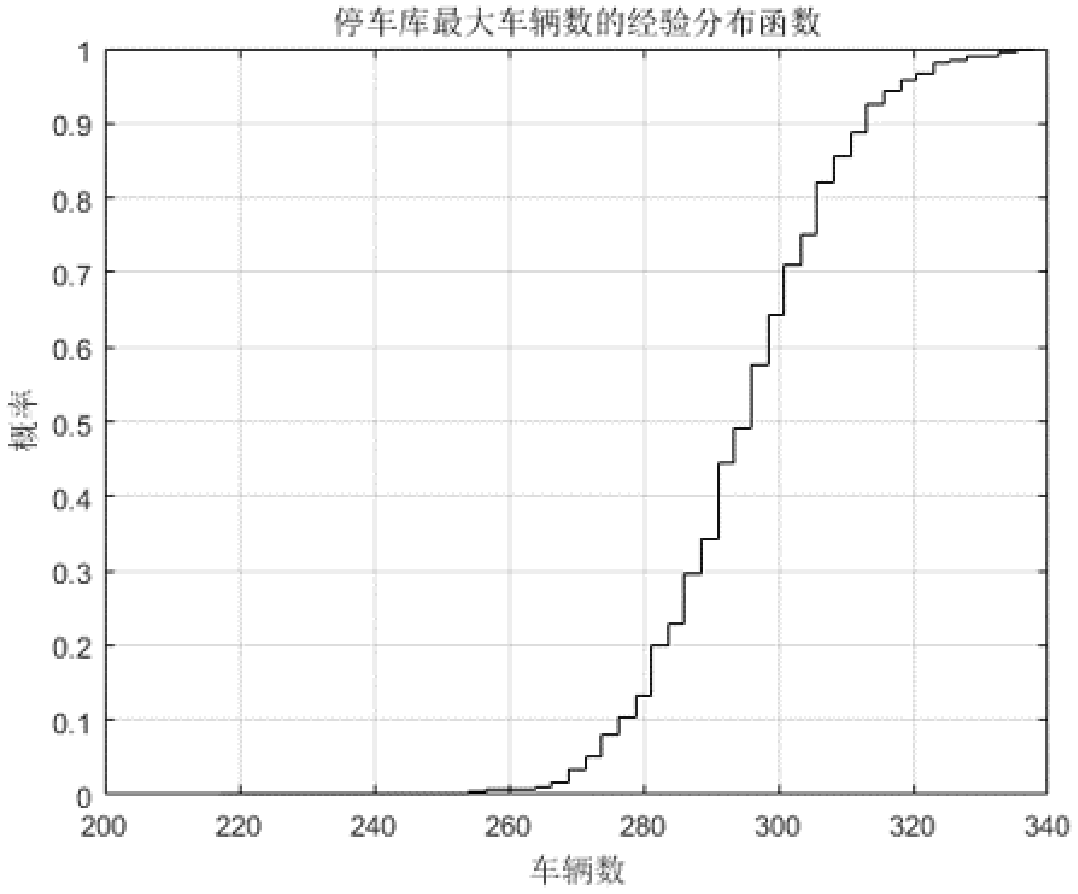


(9)停车库车辆数

模拟结果(二)



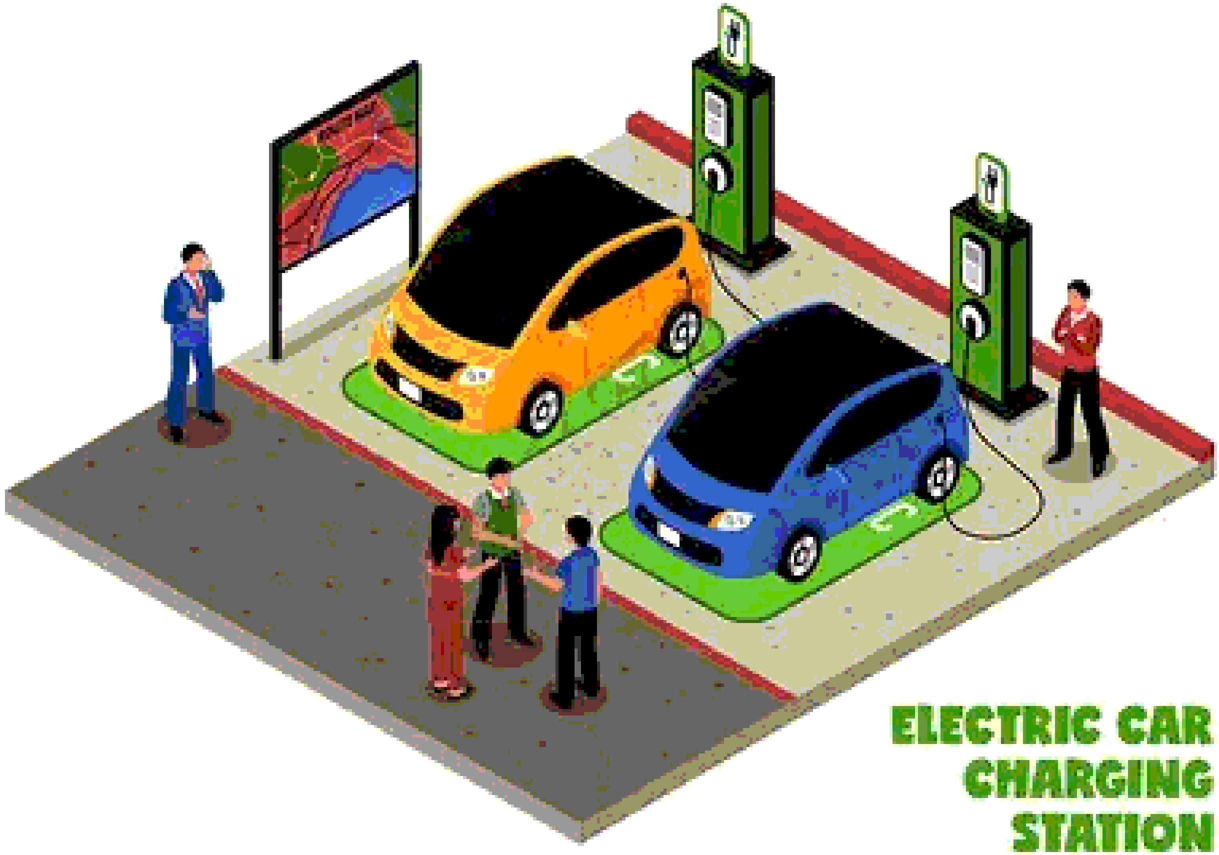
(10)停车库中每天平均车辆数直方图



(11) 停车库中每天最大车辆数的经验分布曲线

3. SimPy简介

汽车充电队列模拟



SimPy一瞥

```
>>> import simpy
>>>
>>> def clock(env, name, tick):
...     while True:
...         print(name, env.now)
...         yield env.timeout(tick)
...
>>> env = simpy.Environment()
>>> env.process(clock(env, 'fast', 0.5))
<Process(clock) object at 0x...>
>>> env.process(clock(env, 'slow', 1))
<Process(clock) object at 0x...>
>>> env.run(until=2)
fast 0
slow 0
fast 0.5
slow 1
fast 1.0
fast 1.5
```

- Overview
- ⊟ SimPy in 10 Minutes
  - Installation
  - Basic Concepts
  - Process Interaction
  - Shared Resources
  - How to Proceed
- Topical Guides
- Examples
- API Reference
- About SimPy

All examples

- Bank Renege
- Carwash
- Machine Shop
- Movie Renege
- Gas Station Refueling
- Process Communication
- Event Latency

① https://simpy.readthedocs.io/en/latest/simpy_intro/index.html
② Demo_simpy.ipynb

Homework 07

- 第七章：3，6，9

注意：答题方式请仿照 教材7.2 节和 7.3 节中的两个案例分析，并给出模拟程序和结果。

- 上机练习：学习SimPy的使用（软件官网案例），

  选取一个实例，将学习过程/结果记录在作业本上。