概率论与数理统计笔记

刘承杰

南京大学软件学院

2021 年 8 月 7 日

目录

1 概率论的基本概念

1.1 随机试验

定义 1.1 (随机试验) 在概率论中，我们将具有以下三个特点的试验称为随机试验：

1. 可以在相同的条件下重复的进行；
2. 每次试验的可能结果不止一个，并且能事先明确试验的所有可能结果；
3. 进行一次试验之前不能确定哪个结果会出现

1.2 样本空间、随机事件

定义 1.2 (样本空间) 随机事件 E 的所有可能结果组成的集合，记为 S

定义 1.3 (样本点) 样本空间的元素，即 E 的每个结果

定义 1.4 (随机事件) 试验 E 的样本空间 S 的子集为 E 的随机事件，简称**事件**. 在每次试验中，当且仅当这一子集中的一个样本点出现时，称这一**事件发生**

定义 1.5 (基本事件) 由一个样本点组成的单点集，称为基本事件

定义 1.6 (必然事件和不可能事件) 样本空间 S 包含所有的样本点，它是 S 自身的子集，在每次试验中它总是发生的，S 称为**必然事件**. 空集 $\emptyset$ 不包含任何样本点，它也作为样本空间的子集，它在每次试验中都不可能发生，$\emptyset$ 称为**不可能事件**.

定义 1.7 (事件间的关系与事件的运算) 设试验 E 的样本空间为 S, 而 $A, B, A_k(k=1,2,\cdots)$ 是 S 的子集.

1. 若 $A \subset B$, 则称事件 B **包含**事件 A, 这指的是事件 A 发生，则事件 B 必然发生。若 $A \subset B$ 且 $B \subset A$, 即 $A = B$, 则称事件 A 与事件 B **相等**。
2. 事件 $A \cup B = \{x|x \in A或x \in B\}$ 称为事件 A 与事件 B 的**和事件**。当且仅当 A, B 中至少有一个发生时，事件 $A \cup B$ 发生。
   类似地, 称 $\bigcup_{k=1}^{n} A_k$ 为 n 个事件 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 的和事件; 称 $\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k$ 为可列个事件 $A_1, A_2, \cdots$ 的和事件
3. 事件 $A \cap B = \{x|x \in A且x \in B\}$ 称为事件 A 与事件 B 的**积事件**。当且仅当 A, B 同时发生时，事件 $A \cap B$ 发生。
   类似地, 称 $\bigcap_{k=1}^{n} A_k$ 为 n 个事件 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 的积事件; 称 $\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k$ 为可列个事件 $A_1, A_2, \cdots$ 的积事件
4. 事件 $A - B = \{x|x \in A且x \notin B\}$ 称为事件 A 与事件 B 的**差事件**。当且仅当 A 发生、B 不发生时事件 $A - B$ 发生。
5. 若 $A \cap B = \emptyset$, 则称事件 A 与 B 是互不相容的，或**互斥的**。这指的是事件 A 与 B 不能同时发生。基本事件是两两互不相容的。

6. 若 $A \cup B = S$ 且 $A \cap B = \emptyset$, 则称事件 A 与事件 B 互为**逆事件**，又称事件 A 与事件 B 互为**对立事件**。这指的是对每次试验而言，事件 A、B 中必有一个发生，且仅有一个发生。A 的对立事件记为 $\overline{A}$

定理 1.1 (集合运算定律) 设 A、B、C 为事件，则有：

交换律：

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

结合律：

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$$

分配律：

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cap (A \cap C)$$

德摩根律：

$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$$

$$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

1.3 频率与概率

定义 1.8 (频率) 在相同的条件下，进行了 n 次试验，在这 n 次试验中，事件 A 发生的次数 n_A 称为事件 A 发生的频数。比值 $\frac{n_A}{n}$ 称为事件 A 发生的频率，并记为 $f_n(A)$.

定义 1.9 (概率) 设 E 是随机试验，S 是它的样本空间，对于 E 的每一个事件 A 赋予一个实数，记为 $P(A)$，称为事件 A 的概率，如果集合函数 $P(\cdot)$ 满足下列条件：

1. **非负性**：对于每一个事件 A，有 $P(A) \geq 0$;
2. **规范性**：对于必然事件 S, 有 $P(S) = 1$;
3. **可列可加性**：设 $A_1, A_2, \cdots$ 是两两不相容的事件，即对于 $A_iA_j = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, 2, \cdots$，有

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \cdots) = P(A_1) + P(A_2) + \cdots$$

当 $n \to \infty$ 时频率 $f_n(A)$ 在一定意义下接近于概率 $P(A)$

1.4 等可能概型（古典概型）

定义 1.10 (等可能概型) 具有以下两个特点的试验称为等可能概型：

1. 试验的样本空间只包含有限个元素；
2. 试验中每个基本事件发生的可能性相同。

定理 1.2 (等可能概型中事件 A 的概率计算公式) 若事件 A 包含 K 个基本事件，即 $A = e_{i_1} \cup e_{i_2} \cup \cdots \cup e_{i_k}$, 这里 $i_1, i_2, \cdots, i_k$ 是 $1, 2 \cdots, n$ 中某 k 个不同的数，则有：

$$P(A) = \sum_{j=1}^{k} P(\{e_{i_j}\}) = \frac{k}{n} = \frac{A\text{包含的基本事件数}}{S\text{中基本事件的总数}}$$

定理 1.3 (超几何分布的概率公式) 设共有 N 件产品，其中有 D 件次品，从中取 n 件，其中恰好有 $k(k \leq D)$ 件次品的概率为：

$$p = \frac{\binom{D}{k}\binom{N-D}{n-k}}{\binom{N}{n}}$$

1.5 条件概率

定义 1.11 (条件概率) 设 A, B 是两个事件，且 $P(A) > 0$，称

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)}$$

为在事件 A 发生的条件下事件 B 发生的条件概率。

定理 1.4 (乘法定理) 设 $P(A) > 0$, 则有

$$P(AB) = P(B|A)P(A)$$

上式可以推广到多个事件的积事件的情况。例如，设 A, B, C 为事件，且 $P(AB) > 0$, 则有

$$P(ABC) = P(C|AB)P(B|A)P(A)$$

一般地，设 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 为 n 个事件，$n \geq 2$, 且 $P(A_1A_2 \cdots A_{n-1}) > 0$, 则有

$$P(A_1A_2 \cdots A_n) = P(A_n|A_1A_2 \cdots A_{n-1})P(A_{n-1}|A_1A_2 \cdots A_{n-2}) \cdots P(A_2|A_1)P(A_1)$$

定义 1.12 (样本空间的划分) 设 S 为试验 E 的样本空间，$B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为 E 的一组事件，若

1. $B_iB_j = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, 2, \cdots, n$
2. $B_1 \cup B_2 \cup \cdots \cup B_n = S$

则称 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为样本空间的一个划分。

若 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为样本空间的一个划分，那么对于每次试验，事件 $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 中必有且只有一个发生。

定理 1.5 (全概率公式) 设试验 E 的样本空间为 S，A 为 E 的事件，$B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为 S 的一个划分，且 $P(B_i) > 0, i = 1, 2, \cdots, n$, 则

$$P(A) = P(A|B_1)P(B_1) + P(A|B_2)P(B_2) + \cdots + P(A|B_n)P(B_n)$$

定理 1.6 (贝叶斯 (Bayes) 公式) 设试验 E 的样本空间为 S,A 为 E 的事件，$B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为 S 的一个划分，且 $P(A) > 0, P(B_i) > 0, i = 1, 2, \cdots, n$, 则

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_iA)}{P(A)} = \frac{P(A|B_i)P(B_i)}{\sum\limits_{j=1}^{n} P(A|B_j)P(B_j)}, i = 1, 2, \cdots, n$$

1.6 独立性

定义 1.13 (独立性) 设 A, B 是两事件，如果满足等式

$$P(AB) = P(A)P(B)$$

则称事件 A, B 相互独立

同理，对于 A, B, C 三个事件，如果满足等式

$$P(AB) = P(A)P(B)$$

$$P(BC) = P(B)P(C)$$

$$P(AC) = P(A)P(C)$$

$$P(ABC) = P(A)P(B)P(C)$$

则称事件 A, B, C 相互独立。

一般地，设 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 是 $n(n \geq 2)$ 个事件，如果对于其中任意 2 个，任意 3 个，$\cdots$, 任意 n 个事件的积事件的概率都等于各事件概率的积，则称事件 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 相互独立。

2 随机变量及其分布

2.1 随机变量

定义 2.1 (随机变量) 设随机试验的样本空间为 $S=\{e\}$,$X=X(e)$ 是定义在样本空间 S 上的实值单值函数，称 $X=X(e)$ 为随机变量

2.2 离散型随机变量及其分布律

定义 2.2 (离散型随机变量) 全部可能取到的值是有限个或可列无限多个的随机变量，称为离散型随机变量。

定义 2.3 ((0 − 1) 分布) 设随机变量 X 只能取 $0,1$ 两个值，它的分布律是

$$P\{X=k\}=p^k(1-p)^{1-k}, k=0,1 \quad (0<p<1)$$

定义 2.4 (伯努利试验) 设试验 E 只有两个可能结果：A 和 $\overline{A}$, 则称 E 为伯努利 (Bernoulli) 试验. 设 $P(A)=p(0<p<1)$, 此时 $P(\overline{A})=1-p$, 将 E 独立重复进行 n 次，则称这一串重复的独立试验为 n 重伯努利试验。

定义 2.5 (二项分布) 以 X 表示 n 重伯努利试验中事件 A 发生的次数，事件 A 在指定的 $k(0\leq k\leq n)$ 次试验中发生的概率为

$$P\{X=k\}=\binom{n}{k}p^k(1-p)^{n-k}, k=0,1,2,\cdots,n$$

随机变量 X 服从参数为 n,p 的二项分布，并记为 $X\sim b(n,p)$.

定义 2.6 (泊松分布) 设随机变量 X 所有可能取的值为 $0,1,2,\cdots$, 而取各个值的概率为

$$P\{X=k\}=\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, k=0,1,2,\cdots,$$

其中 $\lambda>0$ 是常数。则称 X 服从参数为 λ 的泊松分布，记为 $X\sim\pi(\lambda)$

定理 2.1 (泊松定理) 设 $\lambda>0$ 是一个常数，n 是任意正整数，设 $np_n=\lambda$, 则对于任一固定的非负整数 k, 有

$$\lim_{n\to\infty}\binom{n}{k}{p_n}^k(1-p_n)^{n-k}=\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

2.3 随机变量的分布函数

定义 2.7 (随机变量的分布函数) 设 X 是一个随机变量，x 是任意实数，函数

$$F(X)=P\{X\leq x\}, -\infty<x<\infty$$

称为 X 的分布函数

定理 2.2 (分布函数性质)

1. $F(x)$ 是一个不减函数
2. $0 \le x \le 1$, 且 $F(-\infty) = \lim_{x \to -\infty} F(x) = 0, F(\infty) = \lim_{x \to \infty} F(x) = 1$
3. $F(x+0) = F(x)$, 即 $F(x)$ 是右连续的

反之，具备上述三条性质的函数必是某个随机变量的分布函数。

2.4 连续型随机变量及其概率密度

定义 2.8 (连续型随机变量、概率密度) 如果对于随机变量 X 的分布函数 $F(x)$，存在非负可积函数 $f(x)$，使对于任意实数 x 有

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)\, dt$$

则称 X 为**连续型随机变量**，$f(x)$ 称为 X 的概率密度函数，简称**概率密度**。

定义 2.9 (均匀分布) 若连续型随机变量 X 具有概率密度

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则称 X 在区间 (a,b) 上服从均匀分布，记为 $X \sim U(a,b)$
X 的分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \le x < b \\ 1, & x \ge b \end{cases}$$

定义 2.10 (指数分布) 若连续型随机变量 X 的概率密度为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $\theta > 0$ 为常数，则称 X 服从参数为 θ 的指数分布
X 的分布函数为

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{x}{\theta}}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

定义 2.11 (正态分布) 若连续型随机变量 X 的概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty$$

其中 $\mu, \sigma(\sigma > 0)$ 为常数，则称 X 服从参数为 μ, σ 的正态分布或高斯分布，记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$
X 的分布函数为

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}\, dt$$

特别地，当 $\mu=0,\sigma=1$ 时，称随机变量 X 服从**标准正态分布**，其概率密度和分布函数分别用 $\varphi(x),\Phi(x)$ 表示，有

$$\varphi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{t^2}{2}}$$

$$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}e^{-\frac{t^2}{2}}\,dt$$

对于一般的正态分布，只需通过一个线性变换就能化为标准正态分布：

$$\text{若}X\sim N(\mu,\sigma^2),\text{则}Z=\frac{X-\mu}{\sigma}\sim N(0,1)$$

2.5 随机变量的函数的分布

定理 2.3 设随机变量 X 具有概率密度 $f_x(x),-\infty<x<\infty$，又设函数 $g(x)$ 处处可导且恒有 $g'(x)>0$（或恒有 $g'(x)<0$，则 $Y=g(X)$ 是连续型随机变量，其概率密度为

$$f_Y(y)=\begin{cases} f_x[h(y)]|h'(y)|, & \alpha<y<\beta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $\alpha=\min\{g(-\infty),g(\infty)\},\beta=\max\{g(-\infty),g(\infty)\}$,$h(y)$ 是 $g(x)$ 的反函数

3 多维随机变量及其分布

3.1 二维随机变量

定义 3.1 (联合分布函数) 设 (X,Y) 是二维随机变量，对于任意实数 x,y，二元函数

$$F(x,y)=P\{(X\leq x)\cap(Y\leq y)\}\equiv P\{X\leq x,Y\leq y\}$$

称为二维随机变量 (X,Y) 的**分布函数**，或称为随机变量 X 和 Y 的**联合分布函数**。

如果将二维随机变量 (X,Y) 看成是平面上随机点的坐标，那么分布函数 $F(x,y)$ 在 (x,y) 处的函数值就是随机点 (X,Y) 落在以点 (x,y) 为顶点而位于该点左下方的无穷矩形区域内的概率。

所以，随机点 (X,Y) 落在矩形区域 $\{(x,y)|x_1<x\leq x_2,y_1<y\leq y_2\}$ 的概率为

$$P\{x_1<x\leq x_2,y_1<y\leq y_2\}=F(x_2,y_2)-F(x_2,y_1)+F(x_1,y_1)-F(x_1,y_2)$$

定义 3.2 (联合概率密度) 对于二维随机变量 (X,Y) 的分布函数 $F(x,y)$，如果存在非负可积函数 $f(x,y)$ 使对于任意 x,y 有

$$F(x,y)=\int_{-\infty}^{y}\int_{-\infty}^{x}f(u,v)\,dudv$$

则称 (X,Y) 是**连续型的二维随机变量**, 函数 $f(x,y)$ 称为二维随机变量 (X,Y) 的**概率密度**，或称为随机变量 X 和 Y 的**联合概率密度**。

3.2 边缘分布

定义 3.3 (边缘分布函数) 二维随机变量 (X,Y) 作为一个整体，具有分布函数 $F(x,y)$，而 X 和 Y 都是随机变量，各自也有分布函数，将他们分别记为 $F_X(x),F_Y(y)$, 依次称为二维随机变量 (X,Y) 关于 X 和关于 Y 的**边缘分布函数**, 且

$$F_X(x)=F(x,\infty),F_Y(y)=F(\infty,y)$$

定义 3.4 (边缘分布律) 记

$$p_{i\cdot}=\sum_{j=1}^{\infty}p_{ij}=P\{X=x_i\},\quad i=1,2,\cdots,$$

$$p_{\cdot j}=\sum_{i=1}^{\infty}p_{ij}=P\{Y=y_j\},\quad j=1,2,\cdots,$$

分别称 $p_{i\cdot}(i=1,2,\cdots)$ 和 $p_{\cdot j}(j=1,2,\cdots)$ 为 (X,Y) 关于 X 和 Y 的**边缘分布律**

定义 3.5 (边缘概率密度) 记

$$f_X(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f(x,y)\,dy$$

$$f_Y(y)=\int_{-\infty}^{\infty}f(x,y)\,dx$$

分别称 $f_X(x),f_Y(y)$ 为 (X,Y) 关于 X 和 Y 的边缘概率密度。

3.3 条件分布

定义 3.6 (条件分布律) 设 (X,Y) 是二维离散型随机变量，对于固定的 j，若 $P\{Y=y_j\}>0$, 则称

$$P\{X=x_i|Y=y_j\}=\frac{P\{X=x_i,Y=y_j\}}{P\{Y=y_j\}}=\frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}},i=1,2,\cdots$$

为在 $Y=y_j$ 条件下随机变量 X 的条件分布律

同样，对于固定的 i，若 $P\{X=x_i\}>0$, 则称

$$P\{Y=y_j|X=x_i\}=\frac{P\{X=x_i,Y=y_j\}}{P\{X=X_i\}}=\frac{p_{ij}}{p_{i\cdot}},j=1,2,\cdots$$

为在 $X=x_i$ 条件下随机变量 Y 的条件分布律

定义 3.7 (条件概率密度) 设二维随机变量 (X,Y) 的概率密度为 $f(x,y)$,(X,Y) 关于 Y 的边缘概率密度为 $f_Y(y)$. 若对于固定的 $y,f_Y(y)>0$，则称 $\frac{f(x,y)}{f_Y(y)}$ 为在 $Y=y$ 的条件下 X 的条件概率密度，记为

$$f_{X|Y}(x|y)=\frac{f(x,y)}{f_Y(y)}$$

称 $\displaystyle\int_{-\infty}^{x}f_{X|Y}(x|y)\,dx=\int_{-\infty}^{x}\frac{f(x,y)}{f_Y(y)}\,dx$ 为在 $Y=y$ 的条件下 X 的条件分布函数，记为 $P\{X\le x|Y=y\}$ 或 $F_{X|Y}(x|y)$，即

$$F_{X|Y}(x|y)=P\{X\le x|Y=y\}=\int_{-\infty}^{x}\frac{f(x,y)}{f_Y(y)}\,dx$$

类似地，可以定义 $f_{Y|X}(y|x)=\dfrac{f(x,y)}{f_X(x)}$ 和 $F_{Y|X}(y|x)=\displaystyle\int_{-\infty}^{y}\frac{f(x,y)}{f_X(x)}\,dy$

3.4 相互独立的随机变量

定义 3.8 (相互独立) 若对于所有 x,y，满足下列条件之一，则称随机变量 X 和 Y 是相互独立的：

1. 设 $F(x,y)$ 及 $F_X(x),F_Y(y)$ 分别是二维随机变量 (X,Y) 的分布函数及边缘分布函数，有

$$F(x,y)=F_X(x)F_Y(y)$$

2. 设 $f(x,y),f_X(X),f_Y(y)$ 分别为 (X,Y) 的概率密度和边缘概率密度, 有

$$f(x,y)=f_X(x)f_Y(y)$$

3. 当 X,Y 是离散型随机变量是，对于 (X,Y) 的所有可能取值 (x_i,y_i)，有

$$P\{X=x_i,Y=y_i\}=P\{X=x_i\}P\{Y=y_i\}$$

定理 3.1 设 $(X_1,X_2,\cdots,X_m)$ 和 $(Y_1,Y_2,\cdots,Y_n)$ 相互独立，则 $X_i(i=1,2,\cdots,m)$ 和 $Y_j(j=1,2,\cdots,n)$ 相互独立。又若 h,g 是连续函数，则 $h(X_1,X_2,\cdots,X_m)$ 和 $g(Y_1,Y_2,\cdots,Y_n)$ 相互独立。

3.5 两个随机变量的函数的分布

定义 3.9 ($Z = X + Y$ 分布) 设 (X, Y) 是二维连续型随机变量，它具有概率密度 $f(x, y)$，则 $Z = X + Y$ 仍为连续型随机变量，其概率密度为

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z-y, y)\,dy, \tag{1}$$

或

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, z-x)\,dx. \tag{2}$$

又若 X 和 Y 相互独立，设 (X, Y) 关于 X, Y 的边缘密度分别为 $f_X(x), f_Y(y)$，则(1),(2)分别可化为

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-y) f_Y(y)\,dy$$

和

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) f_Y(z-x)\,dx$$

这两个公式称为 f_X 和 f_Y 的**卷积公式**，记为 $f_X * f_Y$，即

$$f_X * f_Y = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-y) f_Y(y)\,dy = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) f_Y(z-x)\,dx$$

定理 3.2 有限个相互独立的正态随机变量的线性组合仍然服从正态分布

定义 3.10 ($Z = \dfrac{Y}{X}$ 分布、$Z = XY$ 的分布) 设 (X, Y) 是二维连续型随机变量，它具有概率密度 $f(x, y)$，则 $Z = \dfrac{Y}{X}, Z = XY$ 仍为连续型随机变量，其概率密度分别为

$$f_{Y/X}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| f(x, xz)\,dx; \tag{3}$$

$$f_{XY}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|x|} f(x, \frac{z}{x})\,dx. \tag{4}$$

又若 X 和 Y 相互独立，设 (X, Y) 关于 X, Y 的边缘密度分别为 $f_X(x), f_Y(y)$，则(3)可化为

$$f_{Y/X}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| f_X(x) f_Y(xz)\,dx$$

(4)可化为

$$f_{XY}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|x|} f_X(x) f_Y(\frac{z}{x})\,dx$$

定义 3.11 ($M = \max\{X, Y\}$ 分布及 $N = \min\{X, Y\}$ 分布) 设 X, Y 是两个相互独立的随机变量，它们的分布函数分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$，可得 $M = \max\{X, Y\}$ 的分布函数为

$$F_{\max}(z) = F_X(z) F_Y(z)$$

类似地，可得到 $N=\min\{X,Y\}$ 的分布函数为

$$F_{\min}(z)=1-[1-F_X(z)][1-F_Y(z)]$$

以上结果容易推广到 n 个相互独立的随机变量的情况。设 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 是 n 个相互独立的随机变量，它们的分布函数分别为 $F_{X_i}(x_i)(i=1,2,\cdots,n)$，则 $M=\max\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$ 及 $N=\min\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$ 的分布函数分别为

$$F_{\max}(z)=F_{X_1}(z)F_{X_2}(z)\cdots F_{X_n}(z)$$

$$F_{\min}(z)=1-[1-F_{X_1}(z)][1-F_{X_2}(z)]\cdots[1-FX_n(z)]$$

特别地，当 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 相互独立且具有相同分布函数 $F(x)$ 时有

$$F_{\max}(z)=[F(z)]^n$$

$$F_{\min}(z)=1-[1-F(z)]^n$$

4 随机变量的数字特征

4.1 数学期望

定义 4.1 (数学期望) 设离散型随机变量 X 的分布律为 $P\{X=x_k\}, k=1,2,\cdots$. 若级数 $\sum\limits_{k=1}^{\infty} x_k p_k$ 绝对收敛，则称级数 $\sum\limits_{k=1}^{\infty} x_k p_k$ 的和为随机变量 X 的**数学期望**，记为 $E(X)$，即

$$E(X)=\sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k$$

设连续型随机变量 X 的概率密度为 $f(x)$,若积分 $\int_{-\infty}^{\infty} x f(x)\,dx$ 绝对收敛,则称积分 $\int_{-\infty}^{\infty} x f(x)\,dx$ 的值为随机变量 X 的**数学期望**，记为 $E(X)$，即

$$E(X)=\int_{-\infty}^{\infty} x f(x)\,dx$$

数学期望 $E(X)$ 完全由随机变量 X 的概率分布所确定。

定理 4.1 设 Y 是随机变量 X 的函数：$Y=g(X)$（g 是连续函数）

(i) 如果 X 是离散型随机变量,它的分布律为 $P=\{X=x_k\}=p_k, k=1,2,\cdots$，若 $\sum\limits_{k=1}^{\infty} g(x_k)p_k$ 绝对收敛，则有

$$E(Y)=E[g(x)]=\sum_{k=1}^{\infty} g(x_k)p_k$$

(ii) 如果 X 是连续型随机变量，它的概率密度为 $f(x)$，若 $\int_{-\infty}^{\infty} g(x)f(x)\,dx$ 绝对收敛，则有

$$E(Y)=E[g(x)]=\int_{-\infty}^{\infty} g(x)f(x)\,dx$$

上述定理还可以推广到两个或两个以上随机变量的函数的情况。

例如设 Z 是随机变量 X,Y 的函数 $Z=g(X,Y)$（g 是连续函数）, 那么，Z 是一个一维随机变量。若二维随机变量 (X,Y) 的概率密度为 $f(x,y)$，则有

$$E(Z)=E[g(X,Y)]=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y)f(x,y)\,dxdy$$

这里设上式右边的积分绝对收敛。又若 (X,Y) 为离散型随机变量，其分布律为 $P=\{X=x_i, Y=y_j\}=p_{ij}, i,j=1,2,\cdots$，则有

$$E(Z)=E[g(X,Y)]=\sum_{j=1}^{\infty}\sum_{i=1}^{\infty} g(x_i,y_j)p_{ij}$$

这里设上式右边的级数绝对收敛。

定理 4.2 数学期望的性质：

1° 设 C 是常数，则有 $E(C) = C$

2° 设 X 是一个随机变量，C 是常数，则有

$$E(CX) = CE(X)$$

3° 设 X, Y 是两个随机变量，则有

$$E(X+Y) = E(X) + E(Y)$$

这一性质可以推广到任意有限个随机变量之和的情况

4° 设 X, Y 是两个相互独立的随机变量，则有

$$E(XY) = E(X)E(Y)$$

这一性质可以推广到任意有限个相互独立的随机变量之积的情况

4.2 方差

定义 4.2 (方差) 设 X 是一个随机变量，若 $E\{[X - E(X)]^2\}$ 存在，则称 $E\{[X - E(X)]^2\}$ 为 X 的方差，记为 $D(X)$ 或 $\mathrm{Var}(X)$，即

$$D(X) = \mathrm{Var}(X) = E\{[X - E(X)]^2\}$$

在应用上还引入量 $\sqrt{D(X)}$，记为 $\sigma(X)$，称为**标准差**或**均方差**。

对于离散型随机变量，有

$$D(X) = \sum_{k=1}^{\infty} [x_k - E(X)]^2 p_k$$

其中 $P = \{X = x_k\} = p_k, k = 1, 2, \cdots$ 是 X 的分布律

对于连续型随机变量，有

$$D(X) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 f(x)\, dx$$

其中 $f(x)$ 是 X 的概率密度

随机变量 X 的方差可按下列公式计算

$$D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$$

定理 4.3 方差的性质：

1° 设 C 是常数，则 $D(C) = 0$

2° 设 X 是随机变量，C 是常数，则有

$$D(CX) = C^2 D(X) \qquad D(X+C) = D(X)$$

3° 设 X, Y 是两个随机变量，则有

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y) + 2E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$$

特别地，若 X, Y 相互独立，则有

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y)$$

这一性质可以推广到任意有限多个相互独立的随机变量之和的情况

4° $D(X) = 0$ 的充要条件是 X 以概率 1 取常数 $E(X)$，即

$$P\{X = E(X)\} = 1$$

定理 4.4 (切比雪夫 (Chebyshev) 不等式) 设随机变量 X 具有数学期望 $E(X) = \mu$，方差 $D(X) = \sigma^2$，则对于任意整数 ε，有不等式

$$P\{|X - \mu| \geq \varepsilon\} \leq \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2}$$

也可写为

$$P\{|X - \mu| < \varepsilon\} \geq 1 - \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2}$$

4.3 协方差及相关系数

定义 4.3 (协方差、相关系数) 量 $E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$ 称为随机变量 X 与 Y 的**协方差**，记为 $\mathrm{Cov}(X, Y)$，即

$$\mathrm{Cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$$

而

$$\rho_{XY} = \frac{\mathrm{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}$$

称为随机变量的 X 和 Y 的**相关系数**。

协方差的计算公式：

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y) + 2\mathrm{Cov}(X, Y) \qquad \mathrm{Cov} = E(X, Y) - E(X)E(Y)$$

定理 4.5 协方差的性质：

1. $\mathrm{Cov}(aX, bY) = ab\mathrm{Cov}(X, Y)$，$a, b$ 是常数；
2. $\mathrm{Cov}(X_1 + X_2, Y) = \mathrm{Cov}(X_1, Y) + \mathrm{Cov}(X_2, Y)$

定理 4.6 ρ_{XY} 的性质：

1. $|\rho_{XY}| \le 1$
2. $|\rho_{XY}| = 1$ 的充要条件是，存在常数 a, b，使得 $P\{Y = a + bX\} = 1$

ρ_{XY} 是一个可以用来表征 X, Y 之间线性关系紧密程度的量，当 $|\rho_{XY}|$ 较大时，X, Y 线性相关程度较好，当 $|\rho_{XY}|$ 较小时，X, Y 线性相关程度较差，当 $|\rho_{XY}| = 0$ 时，称 X 和 Y 不相关。

4.4 矩、协方差矩阵

定义 4.4 设 X 和 Y 是随机变量。

若

$$E(X^k) \quad k = 1, 2, \cdots$$

存在，则称它为 X 的k **阶原点矩**，简称k **阶矩**.

若

$$E\{[X - E(X)]^k\} \quad k = 2, 3, \cdots$$

存在，则称它为 X 的k **阶中心矩**.

若

$$E\{[X - E(X)]^k [Y - E(Y)]^l\} \quad k, l = 1, 2, \cdots$$

存在，则称它为 X 和 Y 的$k + l$ **阶混合中心矩**.

定义 4.5 (协方差矩阵) 先以二维随机变量为例。二维随机变量 (X_1, X_2) 有四个二阶中心矩（设它们都存在），分别记为

$$c_{11} = E\{[X_1 - E(X_1)]^2\}$$

$$c_{12} = E\{[X_1 - E(X_1)][X_2 - E(X_2)]\}$$

$$c_{21} = E\{[X_2 - E(X_2)][X_1 - E(X_1)]\}$$

$$c_{22} = E\{[X_2 - E(X_2)]^2\}$$

将它们排成矩阵的形式

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$$

这个矩阵称为随机变量 (X_1, X_2) 的**协方差矩阵**。

设 n 维随机变量 $(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 的二阶混合中心矩 $c_{ij} = \mathrm{Cov}(X_i, X_j) = E\{[X_i - E(X_i)][X_j - E(X_j)]\}, i, j = 1, 2, \cdots, n$ 都存在，则称矩阵

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}$$

为 n 维随机变量 $(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 的**协方差矩阵**，该矩阵是一个对称矩阵。

5 大数定律及中心极限定理

5.1 大数定律

定理 5.1 (弱大数定理 (辛钦大数定理)) 设 $X_1, X_2, \cdots$ 是相互独立的，服从同一分布的随机变量序列，且具有数学期望 $E(X_k) = \mu(k = 1, 2, \cdots)$。作前 n 个变量的算数平均 $\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_k$，则对于任意 $\varepsilon > 0$，有

$$\lim_{n\to\infty} P\left\{\left|\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_k - \mu\right| < \varepsilon\right\} = 1$$

定义 5.1 设 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_n, \cdots$ 是一个随机变量序列，a 是一个常数。若对于任意正数 ε，有

$$\lim_{n\to\infty} P\{|Y_n - a| < \varepsilon\} = 1$$

则称序列 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_n, \cdots$ **依概率收敛于** a，记为

$$Y_n \xrightarrow{P} a$$

定理 5.2 (弱大数定理 (辛钦大数定理)) 设随机变量 $X_1, X_2, \cdots$ 相互独立，服从同一分布，且具有数学期望 $E(X_k) = \mu(k = 1, 2, \cdots)$，则序列 $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_k$ 依概率收敛于 μ，即 $\overline{X} \xrightarrow{P} a$

定理 5.3 (伯努利大数定理) 设 f_A 是 n 次独立重复试验中事件 A 发生的次数，p 是事件 A 在每次试验中发生的概率，则对于任意正数 $\varepsilon > 0$，有

$$\lim_{n\to\infty} P\left\{\left|\frac{f_A}{n} - p\right| < \varepsilon\right\} = 1$$

或

$$\lim_{n\to\infty} P\left\{\left|\frac{f_A}{n} - p\right| \geq \varepsilon\right\} = 0$$

5.2 中心极限定理

定理 5.4 (独立同分布的中心极限定理) 设随机变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n, \cdots$ 相互独立，服从同一分布，且具有数学期望和方差：$E(X_k) = \mu, D(X_k) = \sigma^2 > 0(k = 1, 2, \cdots)$，则随机变量之和 $\boldsymbol{\sum_{k=1}^{n} X_k}$ 的标准化变量

$$Y_n = \frac{\sum\limits_{k=1}^{n} X_k - E(\sum\limits_{k=1}^{n} X_k)}{\sqrt{D(\sum\limits_{k=1}^{n} X_k)}} = \frac{\sum\limits_{k=1}^{n} X_k - n\mu}{\sqrt{n}\sigma}$$

的分布函数 $F_n(x)$ 对于任意 x 满足

$$\lim_{n\to\infty} F_n(x) = \lim_{n\to\infty} P\left\{\frac{\sum\limits_{k=1}^{n} X_k - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} \leq x\right\} = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}\, dt = \Phi(x)$$

评论 该定理表明，均值为 μ，方差为 $\sigma^2>0$ 的独立同分布的随机变量 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 之和 $\sum\limits_{k=1}^{n}X_k$ 的标准化变量，当 n 充分大时，有

$$\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}X_k-n\mu}{\sqrt{n}\sigma}\sim N(0,1)$$

也可改写为

$$\frac{\overline{X}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}\sim N(0,1)\quad \text{或}\quad \overline{X}\sim N(\mu,\sigma^2/n)$$

定理 5.5 (李雅普诺夫 (Lyapunov) 定理) 设随机变量 $X_1,X_2,\cdots,X_n,\cdots$ 相互独立，它们具有数学期望和方差 $E(X_k)=\mu,D(X_k)=\sigma_k^2>0,k=1,2,\cdots$，记 $B_n^2=\sum\limits_{k=1}^{n}\sigma_k^2$。若存在整数 δ，使得当 $n\to\infty$ 时，

$$\frac{1}{B_n^{2+\delta}}\sum_{k=1}^{n}E\{|X_k-\mu_k|^{2+\delta}\}\to 0,$$

则随机变量之和 $\sum\limits_{k=1}^{n}X_k$ 的标准化变量

$$Z_n=\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}X_k-E(\sum\limits_{k=1}^{n}X_k)}{\sqrt{D(\sum\limits_{k=1}^{n}X_k)}}=\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}X_k-\sum\limits_{k=1}^{n}\mu_k}{B_n}$$

的分布函数 $F_n(x)$ 对任意 x，满足

$$\lim_{n\to\infty}F_n(x)=\lim_{n\to\infty}P\left\{\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}X_k-\sum\limits_{k=1}^{n}\mu_k}{B_n}\le x\right\}=\int_{-\infty}^{x}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-t^2/2}\,dt=\Phi(x)$$

评论 该定理表明，在定理的条件下，随机变量

$$Z_n=\frac{\sum\limits_{k=1}^{n}X_k-\sum\limits_{k=1}^{n}\mu_k}{B_n}$$

当 n 很大时，近似地服从正态分布 $N(0,1)$。由此，当 n 很大时，$\sum\limits_{k=1}^{n}X_k=B_nZ_n+\sum\limits_{k=1}^{n}\mu_k$ 近似地服从正态分布 $N(\sum\limits_{k=1}^{n}\mu_k,B_n^2)$。这也就是说，无论各个随机变量 $X_k(k=1,2,\cdots)$ 服从什么分布，只要满足定理的条件，那么它们的和 $\sum\limits_{k=1}^{n}X_k$ 当 n 很大时，就近似地服从正态分布。

定理 5.6 (棣莫弗-拉普拉斯 (De Moivre-Laplace) 定理) 设随机变量 $\eta_n(n=1,2,\cdots)$ 服从参数为 $n,p(0<p<1)$ 的二项分布，则对于任意 x，有

$$\lim_{n\to\infty}P\left\{\frac{\eta_n-np}{\sqrt{np(1-p)}}\le x\right\}=\int_{-\infty}^{x}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-t^2/2}\,dt=\Phi(x)$$

评论 该定理表明，正态分布时二项分布的极限分布。当 n 充分大时，可以用该定理计算二项分布的概率。

6 样本及抽样分布

6.1 随机样本

定义 6.1 设 X 是具有分布函数 F 的随机变量，若 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是具有同一分布函数 F 的、相互独立的随机变量，则称 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为从分布函数 F（或总体 F、或总体 X）得到的**容量为 n 的简单随机样本**，简称**样本**，它们的观察值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 称为**样本值**，又称为 X 的 n 个**独立的观察值**。

由定义得：若 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为 F 的一个样本，则 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 相互独立，且它们的分布函数都是 F，所以 $(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 的分布函数为

$$F^*(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \prod_{i=1}^{n} F(x_i)$$

又若 X 具有概率密度 f，则 $(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 的概率密度为

$$f^*(x_1, x_2, \cdots, x_n) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i)$$

6.2 直方图和箱线图

直方图和箱线图的定义及画法略。

6.3 抽样分布

定义 6.2

定义 6.3 设 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是来自总体 X 的一个样本，$g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 是 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的函数，若 g 中不含未知参数，则称 $g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 是一**统计量**。