

习题答案

司继春

上海对外经贸大学统计与信息学院

1 概率

练习 1. 整数集 \mathbb{Z} 是可数集还是不可数集? 有理数集 \mathbb{Q} 是可数集还是不可数集? 开区间 $(0, 1)$ 是可数集还是不可数集?

解答. 整数集 \mathbb{Z} 是可数集, 有理数集 \mathbb{Q} 是可数集, 开区间 $(0, 1)$ 是不可数集。

练习 2. 思考题: 标准篮球的直径为 24.6cm , 而标准篮筐的直径为 45cm , 如果篮球垂直入框, 中心落点均匀的落在篮筐内, 请问投出空心球的概率有多大? 如果篮球以 60° 角入框呢? 篮球以多大的角度入框则不可能投出空心球?

练习 3. 试用交、并、补三个运算表示 $(E \Delta F)^c$ 。

解答. $E \Delta F = (E \setminus F) \cup (F \setminus E) = (E \cap F^c) \cup (F \cap E^c)$

练习 4.

1. 上例中, 包含 $\{\clubsuit\}$ 的最小 σ -代数是?
2. 现在抛一枚骰子, 则结果的样本空间为 $\Omega_4 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 那么包含所有单个样本点的 σ -代数 \mathcal{F}_4 中有多少个事件?

解答. 1. $\{\emptyset, \Omega, \{\clubsuit\}, \{\heartsuit, \spadesuit, \diamondsuit\}\}$ 2. $\binom{6}{0} + \binom{6}{1} + \binom{6}{2} + \cdots + \binom{6}{6} = 2^6 = 64$

练习 5. 百年一遇的自然灾害 (即每年发生的概率为 $p = 1\%$) 10 年期间至少发生 1 次的概率是多少? (假设这种自然灾害每年发生与否是独立的)

解答. $1 - (1 - 1\%)^{10} \approx 9.6\%$

练习 6. 七个人玩桌游「炸碉堡」, 经过第一轮投票, 已知第一轮三个行动人中有一个是坏人, 剩下的四个人中也有一个是坏人。如果在第二轮中由你选择三个人作为行动人, 你的目标是尽可能的选出三个好人。你有如下三个策略:

1. 从三个人中选一个, 另外四个人中选两个

2. 从三个人中选两个, 另外四个人中选一个

3. 完全从四个人中选出新的三个

请问以上三个策略中, 哪一个策略选出三个好人的概率最高?

练习 7. 给定任意一个连续的分布函数 F 及由其定义的概率函数 P , \mathbb{R} 上的单点集 $\{a, a \in \mathbb{R}\}$ 的概率 $P(\{a, a \in \mathbb{R}\})$ 是多少? 根据概率函数的性质, \mathbb{R} 上的任意可数集的概率 $P(\{a_i, i = 1, 2, \dots, a_i \in \mathbb{R}\})$ 是多少? 所以概率为 0 的事件一定是不可能事件么?

解答. 由于函数 $F(x)$ 为连续函数, 因而:

$$P(\{a, a \in \mathbb{R}\}) = \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(a - \frac{1}{n}, a\right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[F(a) - F\left(a - \frac{1}{n}\right)\right] = 0$$

而由于 $\{a_i, i = 1, 2, \dots, a_i \in \mathbb{R}\}$ 为可数集, 因而:

$$P(\{a_i, i = 1, 2, \dots, a_i \in \mathbb{R}\}) = \sum_{i=1}^{\infty} p(\{a_i\}) = \sum_{i=1}^{\infty} 0 = 0$$

因而概率为 0 的时间不一定就是不可能事件。

练习 8. 试证明定理 (4)。

解答. 1. $1 = \mathcal{P}(\Omega) = \mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(A^c), \mathcal{P}(\Omega \setminus A) \geq 0 \Rightarrow \mathcal{P}(\Omega \setminus A) \leq 1$

2. $1 = \mathcal{P}(\Omega) = \mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(A^c) \Rightarrow \mathcal{P}(A^c) = 1 - \mathcal{P}(A)$

3. $1 = \mathcal{P}(\Omega) = \mathcal{P}(\Omega) + \mathcal{P}(\emptyset) \Rightarrow \mathcal{P}(\emptyset) = 0$

4. 由于 $A \setminus B = A \cap B^c$, 因而 $(A \setminus B) \cap (A \cap B) = (A \cap B^c) \cap (A \cap B) = A \cap (B^c \cap B) = \emptyset$, 同时由于 $(A \setminus B) \cup (A \cap B) = (A \cap B^c) \cup (A \cap B) = A \cap (B^c \cup B) = A$, 因而 $\mathcal{P}(A \setminus B) = \mathcal{P}(A) - \mathcal{P}(A \cap B)$ 。

由于 $(A \setminus B) \cap B = (A \cap B^c) \cap B = \emptyset$, $(A \setminus B) \cup B = (A \cap B^c) \cup B = (B \cup A) \cap (B \cup B^c) = (B \cup A)$, 从而 $\mathcal{P}(B \cup A) = \mathcal{P}(A \setminus B) + \mathcal{P}(B) = \mathcal{P}(A) - \mathcal{P}(A \cap B) + \mathcal{P}(B)$ 。

5. 同上, $\mathcal{P}(B \setminus A) = \mathcal{P}(B) - \mathcal{P}(A \cap B)$, 由于 $A \subset B$, 所以 $\mathcal{P}(A \cap B) = \mathcal{P}(A)$, 所以 $\mathcal{P}(A) = \mathcal{P}(B) - \mathcal{P}(B \setminus A) \leq \mathcal{P}(B)$ 。

6. 令 $B_1 = A_1$, 对于 $i > 1$, 令 $B_i = A_i \setminus \left(\bigcup_{j=1}^{i-1} A_j\right)$, 从而 $B_i \cap B_j = \emptyset$, 且

$$\mathcal{P}\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \mathcal{P}\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} B_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{P}(B_i) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{P}(A_i)$$

7. 由于 $C_i \cap C_j = \emptyset$, 且 $\bigcup_i C_i = \Omega$, 所以 $(A \cap C_i) \cap (A \cap C_j) = A \cap (C_i \cap C_j) = \emptyset$, $\bigcup_i (A \cap C_i) = A \cap (\bigcup_i C_i) = A \cap \Omega = A$, 所以 $\sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{P}(A \cap C_i) = \mathcal{P}(\bigcup_i (A \cap C_i)) = \mathcal{P}(A)$ 。

练习 9. 请给出两个事件至少有一个发生的概率, $\mathcal{P}(A \cup B)$ 的一个上界和一个下界。

解答. $\mathcal{P}(A \cup B) = \mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(B) - \mathcal{P}(A \cap B)$, 由于 $0 \leq \mathcal{P}(A \cap B) \leq \min(\mathcal{P}(A), \mathcal{P}(B))$, 从而:

$$\mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(B) - \min(\mathcal{P}(A), \mathcal{P}(B)) = \max(\mathcal{P}(A), \mathcal{P}(B)) \leq \mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(B) - \mathcal{P}(A \cap B)$$

以及:

$$\mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(B) - \mathcal{P}(A \cap B) \leq \mathcal{P}(A) + \mathcal{P}(B)$$

练习 10. 试证明定理 (7)。

解答. 由于:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(A \cap B^c) &= \mathcal{P}(A \setminus B) \\ &= \mathcal{P}(A) - \mathcal{P}(A \cap B) \\ &= \mathcal{P}(A) - \mathcal{P}(A) \cdot \mathcal{P}(B) \\ &= \mathcal{P}(A)(1 - \mathcal{P}(B)) \\ &= \mathcal{P}(A) \mathcal{P}(B^c) \end{aligned}$$

其他同理。

2 随机变量

练习 11. 在研究中, 对收入等变量取对数是非常常见的处理手段。如果 $X > 0$ 代表总体收入, 那么 $\mathbb{E}(X)$ 和 $\exp[\mathbb{E}(\ln X)]$ 哪一个更大?

解答. 比较 $\mathbb{E}(X)$ 和 $\exp[\mathbb{E}(\ln X)]$ 等价于比较 $\ln[\mathbb{E}(X)]$ 和 $\mathbb{E}(\ln X)$, 由于 $\ln(\cdot)$ 函数为凹函数, 根据 Jensen 不等式, 有 $\ln[\mathbb{E}(X)] \geq \mathbb{E}(\ln X)$, 即 $\mathbb{E}(X) \geq \exp[\mathbb{E}(\ln X)]$

练习 12. 如果 $\text{r.v. } X \sim \text{Binomial}(n, p)$, 求随机变量 $Y = n - X$ 的概率质量函数。

解答. $P(Y = k) = P(n - X = k) = P(X = n - k) = \binom{n}{n-k} p^{n-k} (1-p)^k$

练习 13. 求对数正态分布 ($Y = e^X, X \sim N(0, 1)$) 的概率密度函数。

解答. Y 的分布函数:

$$\begin{aligned}
 P(Y \leq y) &= P(e^X \leq y) \\
 &= P(X \leq \ln y) \\
 &= \Phi(\ln y)
 \end{aligned}$$

因而其密度函数：

$$f = \frac{1}{y} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(y))^2}{2}}$$

练习 14. 证明：对于一个随机变量 $X \sim F_X$ ，随机变量 $Y = F_X(X) \sim Uniform(0, 1)$ 。

解答. $Y \in [0, 1]$ ，其分布函数：

$$\begin{aligned}
 P(Y \leq y) &= P(F_X(X) \leq y) \\
 &= P(X \leq F_X^{-1}(y)) \\
 &= \int_{-\infty}^{F_X^{-1}(y)} dF_X \\
 &= F_X(F_X^{-1}(y)) - F_X(-\infty) \\
 &= y - 0 = y
 \end{aligned}$$

因而 $Y \sim Uniform(0, 1)$ 。

练习 15. 使用任何编程语言，通过均匀分布生成 100 个 Logistic 分布（分布函数 $\frac{e^x}{1+e^x}$ ）的随机数，并将理论分布函数及其经验分布函数画在一张图中。其中经验分布函数的定义为：

$$\hat{F}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1(X_i \leq x)$$

即样本中小于 x 的样本的 s 比例。观察两者是否贴近？生成 1000 个数据，重复以上步骤，并比较两张图的差异。

练习 16. 使用任何编程语言，通过均匀分布生成 100 个服从泊松分布（ $\lambda = 1$ ）的随机数，并计算均值。

3 常用分布

练习 17. 求负二项分布的方差。

解答. 由于:

$$\begin{aligned}
 E(Z^2) &= \sum_{z=r}^{\infty} z^2 \cdot \binom{z-1}{r-1} p^r (1-p)^{z-r} \\
 &= \sum_{z=r}^{\infty} z^2 \cdot \frac{(z-1)!}{(r-1)!(z-r)!} p^r (1-p)^{z-r} \\
 &= \frac{r}{p} \sum_{z=r}^{\infty} (z+1-1) \frac{z!}{r!(z-r)!} p^{r+1} (1-p)^{z-r} \\
 &= \frac{r}{p} \sum_{z=r}^{\infty} (z+1) \frac{z!}{r!(z-r)!} p^{r+1} (1-p)^{z-r} \\
 &\quad - \frac{r}{p} \sum_{z=r}^{\infty} \frac{z!}{r!(z-r)!} p^{r+1} (1-p)^{z-r} \\
 &= \frac{r}{p} \sum_{z=r}^{\infty} \frac{(z+1)!}{r!(z-r)!} p^{r+1} (1-p)^{z-r} - \frac{r}{p} \\
 &= \frac{r}{p} \sum_{z=r}^{\infty} \frac{(r+1)}{p} \frac{z'!}{r'!(z'-r')!} p^{r'+1} (1-p)^{z-r} - \frac{r}{p} \\
 &= \frac{r(r+1)}{p^2} - \frac{r}{p} = \frac{r^2+r-rp}{p^2} \\
 &\quad (r'=r+1, z'=z+1)
 \end{aligned}$$

$$\text{从而 } \text{Var}(Z) = \mathbb{E}(Z^2) - [\mathbb{E}(Z)]^2 = \frac{r^2+r-rp}{p^2} - \frac{r^2}{p^2} = \frac{r(1-p)}{p^2}$$

练习 18. 证明几何分布的无记忆性。

解答. 根据条件概率的定义, 由于 $s > t$,

$$P(V > s | V > t) = \frac{P(V > s, V > t)}{P(V > t)} = \frac{P(V > s)}{P(V > t)} = \frac{p^s}{p^t} = p^{s-t} = P(V > s-t)$$

练习 19. 计算泊松分布的方差。

解答. 由于:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}(X^2) &= e^{-\lambda} \sum_{x=0}^{\infty} x^2 \frac{\lambda^x}{x!} \\
 &= \lambda e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} x \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} \\
 &= \lambda e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} (x-1+1) \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} \\
 &= \lambda e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} (x-1) \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} + \lambda e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} \\
 &= \lambda e^{-\lambda} \sum_{x'=0}^{\infty} x' \frac{\lambda^{x'}}{x'!} + \lambda \\
 &= \lambda^2 + \lambda \\
 &\quad (x' = x-1)
 \end{aligned}$$

从而其方差: $\text{Var}(X) = \mathbb{E}(X^2) - [\mathbb{E}(X)]^2 = \lambda^2 + \lambda - \lambda^2 = \lambda$

练习 20. 计算 $\Gamma(\alpha, \beta)$ 分布的方差。

解答. 由于:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}(X^2) &= \int_0^{\infty} x^2 \frac{1}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \\
 &= \alpha \beta \int_0^{\infty} x \frac{1}{\Gamma(\alpha+1) \beta^{\alpha+1}} x^{\alpha} e^{-x/\beta} dx \\
 &= \alpha \beta \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\alpha+1) \beta^{\alpha+1}} x^{\alpha+1} e^{-x/\beta} dx \\
 &= \alpha \beta \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\alpha+2) \beta^{\alpha+2}} (\alpha+1) \beta x^{\alpha+1} e^{-x/\beta} dx \\
 &= \alpha \beta (\alpha+1) \beta \int_0^{\infty} \frac{1}{\Gamma(\alpha+2) \beta^{\alpha+2}} x^{\alpha+1} e^{-x/\beta} dx \\
 &= \alpha (\alpha+1) \beta^2
 \end{aligned}$$

因而 $\text{Var}(X) = \mathbb{E}(X^2) - [\mathbb{E}(X)]^2 = \alpha(\alpha+1)\beta^2 - \alpha^2\beta^2 = \alpha\beta^2$

练习 21. 求标准正态分布的偏度、峰度。

解答. 根据标准分布的对称性, $\mathbb{E}(X^3) = 0$, 而

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^2 e^{-\frac{x^2}{2}} dx &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}} x e^{-\frac{x^2}{2}} dx^2 \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{1}{2} x^3 e^{-\frac{x^2}{2}} \right]_{-\infty}^{\infty} - \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^2 dx e^{-\frac{x^2}{2}} \\ &= -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^2 (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^2 dx + \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^4 e^{-\frac{x^2}{2}} dx\end{aligned}$$

从而:

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^4 e^{-\frac{x^2}{2}} dx &= 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} x^2 dx \\ &= 3\end{aligned}$$

练习 22. Pareto 分布的密度函数为:

$$f(x|a, \beta) = \beta \cdot a^\beta x^{-(\beta+1)}, x > a$$

那么 Pareto 分布是否属于指数分布族?

解答. $f(x|a, \beta) = 1_{(a, \infty)}(x) \exp\{-(\beta+1) \cdot x + \ln \beta + \beta \ln a\}$, 由于 $1_{(a, \infty)}(x)$ 不仅仅依赖于 x 还依赖于 a , 所以不属于指数分布族。

练习 23. 请用定理 (1) 计算指数分布、泊松分布的期望和方差。

解答. 对于指数分布, 其密度函数: $f(x|\beta) = 1_{(0, \infty)}(x) \exp\left\{-x \cdot \frac{1}{\beta} - \ln \beta\right\}$, 可知 $T(X) = X$ 。令 $\lambda = -\frac{1}{\beta}$, 那么其规范形式为: $f(x|\beta) = 1_{(0, \infty)}(x) \exp\left\{x \cdot \lambda - \ln\left[-\frac{1}{\lambda}\right]\right\}$, 因而

$$\mathbb{E}(X) = \frac{\partial \ln\left[-\frac{1}{\lambda}\right]}{\partial \lambda} = -\lambda \cdot \frac{1}{\lambda^2} = -\frac{1}{\lambda} = \beta$$

而其方差为:

$$\text{Var}(X) = \frac{\partial^2 \ln\left[-\frac{1}{\lambda}\right]}{\partial \lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} = \beta^2$$

对于泊松分布, 其密度函数: $P(x|\lambda) = \frac{1}{x!} \exp\{x \ln(\lambda) - \lambda\}$, 可知 $T(X) = X$ 。令 $\delta = \ln \lambda$, 其规范形式为: $P(x|\lambda) = \frac{1}{x!} \exp\{x\delta - e^\delta\}$ 。从而 $\mathbb{E}(X) = e^\delta = \lambda$, $\text{Var}(X) = e^\delta = \lambda$ 。

练习 24. 对于一个向量 $x \in \mathbb{R}^n$ 以及一个权重向量 $w \in \mathbb{R}^n$, $\sum_{i=1}^n w_i = \iota'w = 1$, 我们希望计算其加权平均:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i$$

请写出一个幂等矩阵 P_w 使得 $P_w x = \bar{x}_w \iota$ 。

解答. 令 $P_\omega = \iota\omega'$, 从而 $P_\omega^2 = \iota\omega'\iota\omega' = \iota\omega' = P_\omega$, 所以 P_ω 为幂等矩阵。同时 $\omega'x = \bar{x}_\omega$, 所以 $P_\omega x = \iota\omega'x = \bar{x}_\omega \iota$

练习 25. 若随即向量 (U, V) 的分布函数为:

$$F_{U,V}(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}, \theta \in [-1, 1)$$

其中 $P(U \in [0, 1]) = 1, P(V \in [0, 1]) = 1$, 求其边缘分布函数和边缘密度函数。

解答. U 的边缘分布:

$$\begin{aligned} F_U(u) &= F_{U,V}(u, \infty) \\ &= F_{U,V}(u, 1) \\ &= \frac{u}{1 - \theta(1-u)(1-1)} \\ &= u \end{aligned}$$

因而边缘密度函数 $f_U(u) = 1, 0 \leq u \leq 1$ 。

练习 26. 如果一个随机变量 $X \sim N(0, 1)$, 现如下定义随机变量 Y :

$$Y = \begin{cases} X - 2 & \text{with prob } 0.5 \\ X + 2 & \text{with prob } 0.5 \end{cases}$$

求 $\text{Var}(Y)$ 。

解答. 如果令随机变量 $Z \sim \text{Ber}(0.5)$, 且独立于 X , 那么 $Y = Z \cdot (X - 2) + (1 - Z) \cdot (X + 2) = X + 2 - 4Z$ 。因而: $\mathbb{E}(Y) = \mathbb{E}(X + 2 - 4Z) = 0 + 2 - 4\mathbb{E}(Z) = 2 - 4 \cdot 0.5 = 0$, 同时

$$\begin{aligned} \text{Var}(Y) &= \text{Var}(X + 2 - 4Z) \\ &= \text{Var}(X) + 16\text{Var}(Z) \\ &= 1 + 16 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = 5 \end{aligned}$$

练习 27. 证明 $g(X) \cdot \mathbb{E}(Y|X) = \arg \min_{h \in \mathbb{H}} \left\{ \mathbb{E} \left[(g(X) \cdot Y - h(X))^2 \right] \right\}$ 。

解答. 反证法, 假设某个 $h_0(X) \neq g(X) \cdot \mathbb{E}(Y|X)$, 且 $h_0(X) = \arg \min_{h \in \mathbb{H}} \left\{ \mathbb{E} \left[(g(X) \cdot Y - h(X))^2 \right] \right\}$, 那么令

$$h'(X) = h_0(X) + \frac{\mathbb{E}[(g(X)Y - h_0(X))g(X)\mathbb{E}(Y|X)]}{\mathbb{E}[(g(X)\mathbb{E}(Y|X))^2]}$$

验证 $\mathbb{E}[(g(X) \cdot Y - h'(X))^2] < \mathbb{E}[(g(X) \cdot Y - h_0(X))^2]$, 因而 $h_0(X)$ 不可能是原问题的解。

练习 28. 证明 $\text{Var}(Y) = \text{Var}[\mathbb{E}(Y|X)] + \mathbb{E}[\text{Var}(Y|X)]$

解答.

$$\begin{aligned}\text{Var}[\mathbb{E}(Y|X)] &= \mathbb{E}[\mathbb{E}(Y|X) - \mathbb{E}(Y)]^2 \\ &= \mathbb{E}\left[(\mathbb{E}(Y|X))^2 + (\mathbb{E}(Y))^2 - 2\mathbb{E}(Y)\mathbb{E}(Y|X)\right] \\ &= \mathbb{E}\left[(\mathbb{E}(Y|X))^2\right] - (\mathbb{E}(Y))^2 \\ \mathbb{E}[\text{Var}(Y|X)] &= \mathbb{E}(Y^2) - \mathbb{E}\left[(\mathbb{E}(Y|X))^2\right]\end{aligned}$$

练习 29. 使用练习 (28) 中的结论, 计算例 (??) 中的 $\text{Var}(M)$ 。

解答. 由于 $\text{Var}(M) = \text{Var}(\mathbb{E}(M|N)) + \mathbb{E}(\text{Var}(M|N))$, 其中 $\mathbb{E}(M|N) = Np$, 因而 $\text{Var}(\mathbb{E}(M|N)) = \text{Var}(Np) = p^2\text{Var}(N) = p^2\lambda$, 而 $\text{Var}(M|N) = Np(1-p)$, 从而 $\mathbb{E}(\text{Var}(M|N)) = \mathbb{E}(Np(1-p)) = \lambda p(1-p)$ 。从而 $\text{Var}(M) = p^2\lambda + \lambda p - \lambda p^2 = \lambda p$ 。

练习 30. 如果随机变量 X 和 Y 相互独立, 求 $\mathbb{E}(Y|X)$ 。

解答. 由于 X 和 Y 相互独立, 从而:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(Y|X) &= \int y f_{Y|X}(y|x) dy \\ &= \int y \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_X(x)} dy \\ &= \int y \frac{f_X(x) f_Y(y)}{f_X(x)} dy \\ &= \mathbb{E}(Y)\end{aligned}$$

练习 31. 使用上述结论, 产生一组二维正态随机变量 $X = (X_1, X_2)$, 使得第一个分量方差为 1, 第二个分量方差为 2, 且其相关系数为 0.5。

练习 32. Γ 分布是否属于指数分布族?

解答. 其密度函数:

$$\begin{aligned}f(x|\alpha, \beta) &= 1_{(0,\infty)} \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \\ &= 1_{(0,\infty)} \exp\left\{(\alpha-1)\ln x - \frac{1}{\beta}x - \ln(\Gamma(\alpha)) - \alpha \ln \beta\right\}\end{aligned}$$

因而属于指数分布族。

练习 33. 使用正态分布的规范形式求 $\mathbb{E}X^3$ 及 $\mathbb{E}X^4$, 并验证 $\frac{\partial^2 C(\lambda)}{\partial \lambda \partial \lambda'}$ 的正定性。

解答. 对于正态分布, 其中 $T(X) = (X^2, X)'$, 且

$$\frac{\partial C(\lambda)}{\partial \lambda} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2^2}{4\lambda_1^2} - \frac{1}{2\lambda_1} \\ -\frac{\lambda_2}{2\lambda_1} \end{bmatrix}$$

那么:

$$\begin{aligned} \text{Var}((X^2, X)') &= \frac{\partial^2 C(\lambda)}{\partial \lambda \partial \lambda'} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2\lambda_1^2} - \frac{\lambda_2^2}{2\lambda_1^3} & \frac{\lambda_2}{2\lambda_1^2} \\ \frac{\lambda_2}{2\lambda_1^2} & -\frac{1}{2\lambda_1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 2\sigma^4 + 4\mu^2\sigma^2 & 2\mu\sigma^2 \\ 2\mu\sigma^2 & \sigma^2 \end{bmatrix} \\ &= \sigma^2 \begin{bmatrix} 2\sigma^2 + 4\mu^2 & 2\mu \\ 2\mu & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其正定性可以根据特征根全都大于 0 判断。

而由于:

$$\begin{aligned} \text{Var}((X^2, X)') &= \mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X^2 \\ X \end{pmatrix} (X^2, X) \right] - \mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X^2 \\ X \end{pmatrix} \right] \mathbb{E} [(X^2, X)] \\ &= \mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X^2 \\ X \end{pmatrix} (X^2, X) \right] - \begin{pmatrix} \mu^2 + \sigma^2 \\ \mu \end{pmatrix} (\mu^2 + \sigma^2, \mu) \end{aligned}$$

从而:

$$\begin{aligned} \mathbb{E} \left[\begin{pmatrix} X^2 \\ X \end{pmatrix} (X^2, X) \right] &= \text{Var}((X^2, X)') + \begin{pmatrix} \mu^4 + \sigma^4 + 2\mu^2\sigma^2 & \mu^3 + \mu\sigma^2 \\ \mu^3 + \mu\sigma^2 & \mu^2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \mu^4 + 3\sigma^4 + 6\mu^2\sigma^2 & \mu^3 + 3\mu\sigma^2 \\ \mu^3 + 3\mu\sigma^2 & \mu^2 + \sigma^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

练习 34. 对于一个二项分布 $X \sim Bi(N, p)$, N 已知, 那么若将 p 视为变量, 那么其共轭先验是什么分布?

解答. 对于二项分布, 有:

$$\begin{aligned} P(x|p) &= \binom{N}{x} \exp \{x [\ln(p) - \ln(1-p)] + N \ln(1-p)\} \\ &\propto \exp \{x \ln(p) + (N-x) \ln(1-p)\} \end{aligned}$$

现在将参数 p 看成变量, 得到:

$$\pi_t(p) \exp \{t_1 \ln(p) + t_2 \ln(1-p) - \ln[k(t)]\}$$

可以看到应该是 Beta 分布

4 大样本理论

练习 35. 写程序近似逼近正态分布的分布函数并画图。

练习 36. 请找出一项表达式使其与如下序列渐进等价:

1. $\ln n + \frac{1}{2}n$
2. $\ln n + \ln(\ln n)$
3. $n^2 + e^n$

练习 37. 请确定 $a_n = \sqrt{\log n}$ 与 $b_n = \log(\sqrt{n})$ 的阶。

练习 38. 请问如下命题是否成立? 若成立, 请给出证明, 若不成立, 请给出反例:

1. $a_n = o(b_n), c_n = o(b_n)$, 那么 $a_n + c_n = o(b_n)$ 。
2. $a_n = o(b_n), c_n = o(d_n)$, 那么 $a_n + c_n = o(b_n + d_n)$ 。

解答. 1. 成立, $\left| \frac{a_n + b_n}{c_n} \right| \leq \left| \frac{a_n}{c_n} \right| + \left| \frac{b_n}{c_n} \right|$
 2. 不成立, $a_n = \frac{1}{n^2}, b_n = \frac{1}{n}, c_n = \frac{1}{n^3}, d_n = -\frac{1}{n}$, 因而 $b_n + d_n = 0$ 。

练习 39. 如果 $h = n^q, -1 < q < 0$, $a_n = \frac{1}{n^2 h^2} + \frac{10}{n^3 h}$, $b_n = 3h^3 + 10h^4$, 求 q 使得 $a_n + b_n$ 以最快的速度趋向于 0。

解答. 由于 $q < 0$, 因而 $\frac{n^2 h^2}{n^3 h} = \frac{n^q}{n} = n^{q-1} \rightarrow 0$, 从而 $\frac{1}{n^3 h} = o\left(\frac{1}{n^2 h^2}\right)$, 从而 $a_n = O(n^{-2} h^{-2})$ 。而同时, $b_n = O(h^3)$, 所以 $a_n + b_n = O(h^3 + n^{-2} h^{-2})$, 当 $q = \frac{2}{3}$ 时, $a_n + b_n$ 以最快的速度趋向于 0。

练习 40. 程序题: 给定一个 p 和一个 n , 重复的生成 n 个服从伯努利分布的随机变量, 并计算其均值 \hat{p}_n 。对于 $n = 10, 20, 30, \dots, 1000$ 重复以上过程, 并将结果以 n 为 x 轴, 将 \hat{p}_n 画在一张图上观察其收敛性。将伯努利分布换成 Cauchy 分布, 再次观察其收敛性。

练习 41. 程序题: 给定一个 p 和一个 n , 重复的生成 n 个服从伯努利分布的随机变量, 并计算 \hat{p}_n 。对于每一个 n , 重复计算出 500 个 \hat{p} 。对于 $n = 3, 10, 30, 100$ 重复以上过程, 并画出每个 n 的情况下 500 个 \hat{p} 的直方图。

练习 42. 程序题: 将上述练习中的伯努利分布换成正态分布的平方, 重复上述练习的过程。换成 Cauchy 分布, 继续重复上述练习的过程。