

# 工程数学第 X 次作业

姓名 - 学号

日期

## 1 作业

### 1.1 第 1 次作业

1. 已知向量  $\alpha_1 = [3, 1, 5, 2]^T$ ,  $\alpha_2 = [10, 5, 1, 10]^T$ ,  $\alpha_3 = [1, -1, 1, 4]^T$ . 若有方程  $3(\alpha_1 - \beta) + 2(\alpha_2 - \beta) = 5(\alpha_3 + \beta)$ , 求  $\beta$ .

**Sol:**

由题  $3(\alpha_1 - \beta) + 2(2\alpha_2 - \beta) = 5(\alpha_3 + \beta)$  可得  $10\beta = 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 5\alpha_3$ , 因此  $\beta = \frac{3}{10}\alpha_1 + \frac{2}{10}\alpha_2 - \frac{5}{10}\alpha_3$ , 代入  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

可得  $\beta = [\frac{12}{5}, \frac{9}{5}, \frac{6}{5}, \frac{3}{5}]^T$ .

2. 证明:  $\{\alpha_1 = [1, 1, 0]^T, \alpha_2 = [0, 0, 2]^T, \alpha_3 = [0, 1, 2]^T\}$  是  $\mathbb{R}^3$  的一个基; 并求  $\beta = [5, 7, -2]^T$  在这个基下的坐标.

**Sol:** 设  $k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + k_3\alpha_3 = 0$ , 则有:

$$\begin{cases} k_1 = 0 \\ k_1 + k_3 = 0 \\ 2k_2 + 2k_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_1 = 0 \\ k_2 = 0 \\ k_3 = 0 \end{cases}$$

因此  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  线性无关, 因此是  $\mathbb{R}^3$  的一个基. 设  $\beta = n_1\alpha_1 + n_2\alpha_2 + n_3\alpha_3$ . 因此有

$$\begin{cases} n_1 = 5 \\ n_1 + n_3 = 7 \\ 2n_2 + 2n_3 = -2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n_1 = 5 \\ n_2 = -3 \\ n_3 = 2 \end{cases}$$

因此  $\beta$  在这个基下的坐标为  $[5, -3, 2]^T$ .

3. 已知  $\{\alpha_1 = [1, 1, 0, 0]^T, \alpha_2 = [0, 0, 1, 1]^T, \alpha_3 = [1, 0, 0, -1]^T, \alpha_4 = [0, 1, 1, 0]^T\}$  是  $\mathbb{R}^4$  的一个基; 用 Schmidt 正交化方法求  $\mathbb{R}^4$  的标准正交基.

**Sol:** Schmidt 正交化: 令  $\beta_1 = \alpha_1 = [1, 1, 0, 0]^T$ ,  $\beta_2 = \alpha_2 - \frac{(\alpha_2, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)}\beta_1 = [0, 0, 1, 1]^T$ ,  $\beta_3 = \alpha_3 - \frac{(\alpha_3, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)}\beta_1 - \frac{(\alpha_3, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)}\beta_2 = [\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}]^T$ .

再将向量单位化得

$$\eta_1 = \frac{\beta_1}{|\beta_1|} = [\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0]^T,$$

$$\eta_2 = \frac{\beta_2}{|\beta_2|} = [0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}]^T,$$

$$\eta_3 = \frac{\beta_3}{|\beta_3|} = [\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}]^T,$$

$$\eta_4 = \frac{\beta_4}{|\beta_4|} = [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}]^T.$$

至此我们得到了所求的  $\mathbb{R}^4$  的标准正交基.

4. 已知  $AP = PB$ , 求  $A$  和  $A^8$ 。其中:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Sol:** 因为  $|P| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 3 \neq 0$ , 因此  $P$  可逆, 又  $AP = PB$ ,

因此存在  $P^{-1}$ , 使得  $A = PBP^{-1}$  成立。

$$\begin{aligned} P^{-1} &= \frac{1}{|P|} P^* = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

因此有  $A = PBP^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \\ -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$

$$A^8 = (PBP^{-1}) \dots (PBP^{-1}) = PBP^{-1}PBP^{-1} \dots PBP^{-1} = PB^8P^{-1}, \blacksquare$$

又  $B^8 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ , 因此

$$\begin{aligned} A^8 &= PB^8P^{-1} = PP^{-1} \\ &= E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

5. 设  $A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$ , 求  $|A|$  和  $|A^{-1}|$ .

**Sol:**

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 6 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 2 \neq 0, \text{ 因此 } A \text{ 可逆, 有 } AA^{-1} = E \Rightarrow |A||A^{-1}| =$$

$$1 \Rightarrow |A^{-1}| = \frac{1}{2}.$$

## 1.2 第 2 次作业

6. 设  $X_1, X_2, X_3$  是取自正态总体  $X$  的样本, 就下列总体  $X$  给出这个样本的概率函数或概率密度:

(1)  $X$  服从参数为  $\lambda$  的 Poisson 分布;

(2)  $X$  服从参数为  $\lambda$  的指数分布, 即概率密度为  $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$

(3)  $X$  在区间  $(a, b)$  上服从均匀分布;

(4)  $X$  服从参数为  $a, b$  的  $\beta$  分布, 即概率密度为  $f(x; a, b) = \begin{cases} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1}(1-x)^{b-1}, & 0 < x < 1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$

记  $X \sim B(a, b)$ .

**Sol:**

(1)  $X$  服从参数为  $\lambda$  的 Poisson 分布为  $P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, k = 0, 1, \dots, P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, X_3 = x_3) = \frac{\lambda^{x_1+x_2+x_3} \cdot e^{-3\lambda}}{x_1! \cdot x_2! \cdot x_3!}.$

(2)  $X$  服从参数为  $\lambda$  的  $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$

$$f(x_1, x_2, x_3) = f(x_1)f(x_2)f(x_3) = \begin{cases} \lambda^3 e^{-\lambda(x_1+x_2+x_3)}, & x_1 > 0, x_2 > 0, \text{ and } x_3 > 0, \\ 0, & x_1 \leq 0, x_2 \leq 0, \text{ or } x_3 \leq 0. \end{cases}$$

(3)  $X$  在区间  $(a, b)$  上服从均匀分布  $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b, \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ , 则

$$f(x_1, x_2, x_3) = f(x_1)f(x_2)f(x_3) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)^3}, & a < x_1, x_2, x_3 < b \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

(4)  $X$  服从参数为  $a, b$  的  $\beta$  分布,

$$f(x_1, x_2, x_3) = f(x_1)f(x_2)f(x_3) \\ = \begin{cases} \left[ \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \right]^3 (x_1 x_2 x_3)^{a-1} \times \\ \quad [(1-x_1)(1-x_2)(1-x_3)]^{b-1}, & 0 < x_1, x_2, x_3 < 1, \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

### 1.3 第 3 次作业

7. 求可逆矩阵  $P$ , 使得  $PA$  为 Hermite 阶梯型矩阵, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 5 \\ 2 & 3 & 5 & 5 & 4 \end{bmatrix}$$

**Sol:** 由于  $P[A : I] = [PA : P] = [H : P]$ , 构造矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & | & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 3 & 1 & 4 & | & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 5 & | & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 5 & 5 & 4 & | & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -2 & 3 & | & -2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 & -4 & | & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 2 & | & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & | & -3 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

因此得到

$$P = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

8. 求矩阵  $A$  的一个满秩分解, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & 2 & 3 \\ 3 & -1 & 8 & 5 & 1 \\ 1 & 3 & -6 & 4 & 7 \end{bmatrix}$$

**Sol:**

对  $A$  进行初等行变换得到

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -2 & 2 & 3 \\ 3 & -1 & 8 & 5 & 1 \\ 1 & 3 & -6 & 4 & 7 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

因此将  $A$  分解为  $A = F \cdot G$ , 其中

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 1 & 1 & -2 \\ 3 & -1 & -6 \\ 1 & 3 & -6 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$$

9. 设  $x$  的相对误差为 1%, 求  $x^n$  的相对误差.

**Sol:**

$$e_r = \frac{e}{x^*} = \frac{x^* - x}{x^*} = 1\%,$$

$$e'_r = \frac{e'}{(x^*)^n} = \frac{(x^*)^n - x^n}{(x^*)^n} = 1 - \left(\frac{x}{x^*}\right)^n = 1 - 0.99^n.$$

10. 从总体  $N(20; (\sqrt{3})^2)$  中抽取容量分别为 10 和 15 的两个相互独立的样本, 求这两个样本均值之差的绝对值小于 0.3 的概率. 这里  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, s_x^2 = \frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2, s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2.$$

**Sol:**

易知  $Y_{10} \sim N\left(20, \frac{3}{10}\right)$ ,  $Y_{15} \sim N\left(20, \frac{1}{5}\right)$ , 则  $Y_{10} - Y_{15} \sim N\left(0, \frac{1}{2}\right)$ ,  
 $Pr(|Y_{10} - Y_{15}| < 0.3) = 2 \cdot \Phi(0.3\sqrt{2}) - 1 = 2 \cdot \Phi(0.4243) - 1$ , 查表可得  
 $Pr(|Y_{10} - Y_{15}| < 0.3) = 0.3286$ .

11. 设  $X_1, \dots, X_5$  是取自总体  $N(0, 1)$  的样本,

- (1) 求常数  $c_1, d_1$ , 使  $c_1(X_1 + X_2)^2 + d_1(X_3 + X_4 + X_5)^2$  服从  $\chi^2$  分布, 并指出其自由度.
- (2) 求常数  $c_2, d_2$ , 使  $\frac{c_2(X_1^2 + X_2^2)}{d_2(X_3 + X_4 + X_5)^2}$  服从 F 分布, 并指出其自由度.

**Sol:**

(1) 已知  $\frac{X_1 + X_2}{\sqrt{2}} \sim N(0, 1)$ ,  $\frac{X_3 + X_4 + X_5}{\sqrt{3}} \sim N(0, 1)$ , 因此有  $\left(\frac{X_1 + X_2}{\sqrt{2}}\right)^2 \sim \chi^2(1)$ ,  $\left(\frac{X_3 + X_4 + X_5}{\sqrt{3}}\right)^2 \sim \chi^2(1)$ , 因此有  $\left(\frac{X_1 + X_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{X_3 + X_4 + X_5}{\sqrt{3}}\right)^2 \sim \chi^2(2)$ .

因此得  $c_1 = \frac{1}{2}$ ,  $d_1 = \frac{1}{3}$ . 自由度为 2.

(2) 由上可知  $X_1^2 + X_2^2 \sim \chi^2(2)$ ,  $\left(\frac{X_3 + X_4 + X_5}{\sqrt{3}}\right)^2 \sim \chi^2(1)$ , 因此有  
 $\frac{\frac{X_1^2 + X_2^2}{2}}{\frac{(X_3 + X_4 + X_5)^2}{3}} \sim F(2, 1)$ ,

因此得  $c_2 = 3$ ,  $d_2 = 2$ , 第一自由度为 2, 第二自由度为 1.

12.  $\lambda$  取何值时, 线性方程组

$$\begin{cases} (2 - \lambda)x_1 + 2x_2 - 2x_3 = 1, \\ 2x_1 + (5 - \lambda)x_2 - 4x_3 = 2, \\ -2x_1 - 4x_2 + (5 - \lambda)x_3 = -\lambda - 1 \end{cases}$$

有唯一解、无解或无穷多解? 在有无穷多解时, 求其一般解.

**Sol:**

构造增广矩阵  $B = [A|b]$ , 再进行初等行变换, 其中  $A$  为系数矩阵.

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{array}{ccc|c} 2-\lambda & 2 & -2 & 1 \\ 2 & 5-\lambda & -4 & 2 \\ -2 & -4 & 5-\lambda & -\lambda-1 \end{array} \right] \\ \Rightarrow & \left[ \begin{array}{ccc|c} 2-\lambda & 5-\lambda & -4 & 2 \\ 0 & 2-\frac{(5-\lambda)(2-\lambda)}{2} & 2-2\lambda & \lambda-1 \\ 0 & 1-\lambda & 1-\lambda & 1-\lambda \end{array} \right] \end{aligned}$$

i) 当  $\lambda = 1$  时, 方程组有无穷多解.

$$B \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 2 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

此时一般解为

$$\begin{cases} x_1 = k_1 \\ x_2 = k_2 \\ x_3 = \frac{k_1 + 2k_2 - 1}{2} \end{cases}$$

ii) 当  $\lambda \neq 0$  时, 有

$$B \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 5-\lambda & -4 & 2 \\ 0 & 0 & \frac{(5-\lambda)(2-\lambda)}{2} - 2\lambda & \lambda + \frac{(5-\lambda)(2-\lambda)}{2} - 3 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

当  $\lambda = 10$  时, 有  $B \Rightarrow \begin{bmatrix} 2 & -5 & -4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $r(A) < r(B)$ , 因此,

当  $\lambda = 10$  时此时方程组无解.

iii) 当  $\lambda \neq 1$  且  $\lambda \neq 10$  时,  $r(A) = r(B)$ , 因此, 当  $\lambda \neq 1$  且  $\lambda \neq 10$  时, 方程有唯一解.

#### 1.4 第 4 次作业

13. 取  $\sqrt{2} \approx 1.4$ , 欲计算  $(\sqrt{2} - 1)^6$  的近似值, 有下列四个算式可采用:

- (1)  $\frac{1}{(\sqrt{2} + 1)^6}$ ;
- (2)  $(3 - 2\sqrt{2})^3$ ;

$$(3) \frac{1}{(3+2\sqrt{2})^3};$$

$$(4) 99 - 70\sqrt{2}.$$

分析这四个算式哪一个所得的误差最小。

**Sol:**

$$x = (\sqrt{2} - 1)^6 \approx 0.4142^6 \approx 5.0506 \times 10^{-3}$$

$$1. x \approx x_1^* = \frac{1}{(1.4+1)^6} = \frac{1}{2.4^6} \approx 5 \times 10^{-3}, \text{ 误差 } e_1 = x_1^* - x \approx -5.06 \times 10^{-5};$$

$$2. x \approx x_2^* = (3 - 2\sqrt{2})^3 = 0.2^3 \approx 8 \times 10^{-3}, \text{ 误差 } e_2 = x_2^* - x \approx 2.9494 \times 10^{-3};$$

$$3. x \approx x_3^* = \frac{1}{(3+2\sqrt{2})^3} = \frac{1}{5.8^3} \approx 5 \times 10^{-3}, \text{ 误差 } e_3 = x_3^* - x \approx -5.06 \times 10^{-5};$$

$$4. x \approx x_4^* = 99 - 70\sqrt{2} \approx 1.0, \text{ 误差 } e_4 = x_4^* - x \approx 9.95^{-1}.$$

我们发现, 第 (1) 和第 (3) 个算式的误差最小.

14. 如何计算下列函数值才比较准确:

$$1. \frac{1}{1+2x} - \frac{1-x}{1+x}, |x| \ll 1;$$

$$2. \sqrt{x + \frac{1}{x}} - \sqrt{x - \frac{1}{x}}, |x| \gg 1;$$

$$3. \frac{1 - \cos x}{x}, |x| \ll 1;$$

$$4. \arctan(x+1) - \arctan(x), |x| \gg 1.$$

**Sol:**

$$1. \text{ 两个相近的数相减会造成误差. } \frac{1}{1+2x} - \frac{1-x}{1+x} = \frac{2x^2}{2x^2 + 3x + 1}$$

$$2. \text{ 两个相近的数相减会造成误差. } \sqrt{x + \frac{1}{x}} - \sqrt{x - \frac{1}{x}} = \frac{2}{\sqrt{x}(\sqrt{x^2 + 1} + \sqrt{x^2 - 1})}$$

$$3. \text{ 两个相近的数相减会造成误差. } \frac{1 - \cos x}{x} = \frac{1 - (1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4!} + o(x^4))}{x} \approx$$

$$\frac{x}{2} - \frac{x^3}{24}$$



4. 两个相近的数相初造成误差.  $\arctan(x+1) - \arctan(x) = \arctan \frac{1}{x^2 + x + 1} \approx$

$$\frac{1}{x^2 + x + 1} - \frac{1}{3(x^2 + x + 1)^3} \approx \boxed{\frac{1}{x^2}}$$

15. 设总体  $X$  服从正态分布  $N(12, 2^2)$ , 现在随机抽取容量为 5 的样本, 问:

1. 此样本最小值小于 10 的概率是多少?

2. 此样本最大值大于 15 的概率是多少?

**Sol:** 易知  $\frac{X - \mu}{\sigma} = \frac{X - 12}{2}$  服从标准正态分布,

1. 设  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  为样本, 则  $p = Pr(\min X_i < 10) = 1 - Pr(\min X_i \geq 10) = 1 - \prod_{i=1}^5 Pr(X_i \geq 10) = 1 - [Pr(X_i \geq 10)]^5$ ,  $Pr(X_i \geq 10) = Pr(\frac{X_i - \mu}{\sigma} \geq \frac{10 - \mu}{\sigma}) = 1 - \Phi(\frac{10 - 12}{2}) = 1 - \Phi(-1) \approx \boxed{0.8413}$ .  
 $p = 1 - [Pr(X_i \geq 10)]^5 \approx 1 - 0.8413^5 \approx 0.5785$

2. 同理, 设  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  为样本, 则  $q = Pr(\max_i \leq 15) = 1 - [Pr(X_i \leq 15)]^5 = 1 - \Phi^5(\frac{15 - 12}{2}) \approx \boxed{0.2923}$ .

## 1.5 第 5 次作业

16. 已知 3 阶方阵  $A$  的属于特征值  $1, 0, -1$  的特征向量依次为  $x_1 = [1, 2, 3]^T$ ,  $x_2 = [2, -2, 1]^T$ ,  $x_3 = [-2, -1, 2]^T$ , 求  $A$  和  $A^8$ .

**Sol:** 令  $X = [x_1 | x_2 | x_3]$ ,  $AX = X \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & -1 \end{bmatrix}$ ,

因  $|X| = -3 \neq 0$ , 有  $A = X \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & -1 \end{bmatrix} X^{-1}$ , 则  $X^{-1} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 2 & -2 & 1 \\ -2 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ .

$$A = X \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & -1 \end{bmatrix} X^{-1} = \boxed{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}}.$$

$$A^8 = X \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & -1 \end{bmatrix}^8 X^{-1} = X \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & 1 \end{bmatrix} X^{-1} = \boxed{\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 5 & 4 & -2 \\ 4 & 5 & 2 \\ -2 & 2 & 8 \end{bmatrix}}.$$

17. 求正交矩阵  $Q$  使  $Q^{-1}AQ$  为对角矩阵, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 5 & -4 & 2 \\ -4 & 5 & -2 \\ 2 & -2 & 2 \end{bmatrix}.$$

**Sol:** 求  $A$  的特征值有  $|A - \lambda I| = 0$ , 得

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} 5 - \lambda & -4 & 2 \\ -4 & 5 - \lambda & -2 \\ 2 & -2 & 2 - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - 1)^2(10 - \lambda) = 0$$

因此得到  $A$  的特征值为  $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = \lambda_3 = 1$ . 对  $\lambda_1 = 10$ , 由特征方程  $|A - \lambda_1 I|X = 0$  得到一个解  $X_1 = [-2, 2, -1]^T$ , 单位化得到  $\varepsilon_1 = [-\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}]^T$ .

对于  $\lambda_2 = \lambda_3 = 1$ , 由  $|A - \lambda_2 I|X = 0$  得到  $2x_1 - 2x_2 + x_3 = 0$  及一个解  $x_2 = [1, 1, 0]^T$ ,  $x_3 = [-1, 1, 4]^T$ , 单位化得到  $\varepsilon_2 = [\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0]^T$ ,  $\varepsilon_3 = [-\frac{1}{3\sqrt{2}}, \frac{1}{3\sqrt{2}}, \frac{4}{3\sqrt{2}}]^T$ .

$$\text{令 } Q = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3] = \begin{bmatrix} -\frac{2}{3} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{6} \\ \frac{2}{3} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{6} \\ -\frac{1}{3} & 0 & \frac{2\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix}, Q^{-1}AQ = \Lambda = \begin{bmatrix} 10 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}.$$

$$18. \text{ 设 } A = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 4 \\ 2 & x & 2 \\ 4 & 2 & -1 \end{bmatrix} \text{ 与 } B = \begin{bmatrix} 5 & & \\ & y & \\ & & -5 \end{bmatrix} \text{ 相似, 求 } x, y.$$

**Sol:** 由于  $A \sim B$ , 因此有  $|A| = |B|$  且  $tr(A) = tr(B)$ .

$$\begin{cases} x + 16 + 16 - 16x + 4 + 4 = -25y \\ -1 + x - 1 = 5 + y - 5 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 1 \\ y = -1 \end{cases}$$

19. 设样本 (1.3, 0.6, 1.7, 2.2 0.3, 1.1) 是取自具有概率密度

$$f(x, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta}, & 0 < x < \beta \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

的总体, 用矩估计法估计总体均值、总体方差及参数  $\beta$ .

**Sol:** 总体均值:  $\alpha_1 = E(x)$ , 用矩估计法估计得到  $\hat{\alpha}_1 = \bar{x} = 1.2$ .

总体方差:  $\alpha_2 = M'_k(x)$ , 用矩估计法得到  $\hat{\alpha}_2 = S_x = 0.488$ .  
 利用总体均值估计参数: 由于

$$\alpha_1 = E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x, \beta) dx = \int_0^{\beta} \frac{x}{\beta} dx = \frac{x^2}{2\beta} \Big|_0^{\beta} = \frac{\beta}{2}$$

则有  $\beta = 2\alpha_1$ . 所以  $\beta$  矩估计值为  $\hat{\beta}_1 = 2\bar{x} = 2.4$ .

20. 设总体  $X$  服从对数正态分布  $LN(\mu, \sigma^2)$ , 其概率函数为

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \mu)^2\right], & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$$

其中,  $\mu, \sigma^2$  均未知,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是取自这个总体的样本, 求  $\mu$  与  $\sigma^2$  的极大似然估计量.

**Sol:** 似然函数为

$$\begin{aligned} L(\mu, \sigma^2) &= \prod_{i=1}^n f(x_i, \mu, \sigma^2) \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^n \prod_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2\right) \\ \ln L(\mu, \sigma^2) &= -\frac{n}{2} \ln 2\pi - \frac{n}{2} \ln \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \ln x_i + \frac{1}{2\sigma^2} \left(\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2\right) \end{aligned}$$

故似然方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mu} \ln L = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (2 \ln x_i + 2\mu) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \sigma^2} \ln L = \frac{n}{2\sigma^2} - \frac{1}{2(\sigma^2)^2} \left(\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2\right) = 0 \end{cases}$$

解得 
$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \\ \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\ln x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i\right)^2 \end{cases}$$

21. 设  $X_1, X_2, X_3$  是取自总体  $X$  的样本, 证明下列统计量都是总体均值  $E(X)$  的无偏估计量:

$$\begin{aligned}t_1(X_1, X_2, X_3) &= \frac{2}{5}X_1 + \frac{1}{5}X_2 + \frac{2}{5}X_3; \\t_2(X_1, X_2, X_3) &= \frac{1}{6}X_1 + \frac{1}{3}X_2 + \frac{1}{2}X_3; \\t_3(X_1, X_2, X_3) &= \frac{1}{7}X_1 + \frac{3}{14}X_2 + \frac{9}{14}X_3.\end{aligned}$$

并问哪一个无偏估计量方差最小?

**Sol:** 上述式子具有一般形式  $t_i(X_1, X_2, X_3) = w_{1,i}X_1 + w_{2,i}X_2 + w_{3,i}X_3$ ,  
 $\sum_{j=1}^3 w_{j,i} = 1$ ,  
 $E[t_i(X_1, X_2, X_3) - E(X)] = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 w_{j,i} E[X_j] - E(X) \left( \sum_{j=1}^3 w_{j,i} - 1 \right) = 0$ ,

从而得证上述式子为  $E(x)$  的无偏估计量. 其均方误差

$$\begin{aligned}r &= E[t_i(X_1, X_2, X_3) - E(x)]^2 \\&= E[t_i(X_1, X_2, X_3)^2] + E[E(X)]^2 - 2E[t_i(X_1, X_2, X_3)E(X)] \\&= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 w_{j,i}^2 X_j^2 + \frac{3}{3} E(X)^2 - \frac{2}{3} E(X) \sum_{j=1}^3 w_{j,i} X_j \\&= \sum_{j=1}^3 [w_{j,i}^2 E[X_j - E(X)]^2] \\&= \sum_{j=1}^3 w_{j,i}^2 \cdot S(X)\end{aligned}$$

均方误差  $r(t_1) = \frac{9}{25}S(X)$ ,  $r(t_2) = \frac{23}{36}S(X)$ ,  $r(t_3) = \frac{94}{196}S(X)$ , 因此无偏估计量  $t_1$  方差最小.

## 1.6 第 6 次作业

22. 用正交线性变换将二次型  $f = x_1^2 + 2x_2^2 + 3x_3^2 + 4x_1x_2 - 4x_2x_3$  化为标准型, 并给出所用的正交线性变换.

**Sol:** 系数矩阵  $A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & -2 \\ 0 & -2 & 3 \end{bmatrix}$ , 则  $A - \lambda I = \begin{bmatrix} 1 - \lambda & 2 & 0 \\ 2 & 2 - \lambda & -2 \\ 0 & -2 & 3 - \lambda \end{bmatrix} =$

$(\lambda - 5)(\lambda + 1)(\lambda - 2) = 0$ . 得到  $A$  得特征值为  $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 5$ .

对于  $\lambda_1 = -1$ , 解线性方程组  $(A - \lambda I)x = 0$ , 得一个基础解系  $x_1 = [2, -2, -1]^T$ , 单位化后得  $\varepsilon_1 = \frac{1}{3}[2, -2, -1]^T$ .

对于  $\lambda_2 = 2$ , 解线性方程组  $(A - \lambda I)x = 0$ , 得一个基础解系  $x_2 = [2, 1, 2]^T$ , 单位化后得  $\epsilon_2 = \frac{1}{3}[2, 1, 2]^T$ .

对于  $\lambda_3 = 5$ , 解线性方程组  $(A - \lambda I)x = 0$ , 得一个基础解系  $x_3 = [1, 2, -2]^T$ , 单位化后得  $\epsilon_3 = \frac{1}{3}[1, 2, -2]^T$ .

于是, 令  $Q = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 1 \\ -2 & 1 & 2 \\ -1 & 2 & -2 \end{bmatrix}^T$ , 则  $Q$  为正交矩阵, 且经

正交线性变换  $x = Qy$ , 二次型  $f$  转化为  $f = -y_1^2 + 2y_2^2 + 5y_3^2$ .

23. 问  $t$  取何值时, 对称矩阵  $A$  是正定的, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t & 1 \\ t & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1-t \end{bmatrix}$$

**Sol:**  $f$  为正定二次型得充要条件是, 顺序主子式都大于 0, 即  $1 > 0$ ,

$$\begin{vmatrix} 1 & t \\ t & 2 \end{vmatrix} = 2 - t^2 > 0, \begin{vmatrix} 1 & t & 1 \\ t & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1-t \end{vmatrix} = t(t+1)(t+2) > 0.$$

解得  $t \in (-1, 0)$ , 此时  $f$  为正定二次型.

24. 随机地从一批钉子中抽取 16 只, 测得其长度 (单位: 厘米) 为

2.14, 2.10, 2.13, 2.15, 2.13, 2.12, 2.13, 2.10,

2.15, 2.12, 2.14, 2.10, 2.13, 2.11, 2.14, 2.11

假定钉长分布是正态的, 求总体均值  $\mu$  的双侧 90% 置信区间:

(1) 若已知  $\sigma = 0.01$  厘米;

(2) 若  $\sigma$  未知.

**Sol:**

(1) 一个正态总体下  $\sigma^2$  已知, 随机变量  $J = \sqrt{n} \frac{(\bar{X} - \mu)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$  服从标准正态分布, 因此取  $\alpha = 0.1$ . 则  $\mu \in [\mu_0, \mu_1]$ ,  $\mu_0 = \bar{X} - \mu_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ ,  $\mu_1 = \bar{X} + \mu_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . 得到  $\bar{X} = 2.125$ , 即  $\mu_0 = 2.125 - 1.6448 \cdot \frac{0.01}{\sqrt{16}} = 2.1209$ , 同理  $\mu_1 = 2.1291$ .  $[2.1209, 2.1291]$

(2) 一个正态总体下  $\sigma^2$  未知, 随机变量  $J = \sqrt{n} \frac{(\bar{X} - \mu)}{S}$  服从  $t(n-1)$  分布, 取  $\alpha = 0.01$ , 则  $\mu \in [\mu_0, \mu_1]$ ,  $\mu_0 = \bar{X} - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}$ ,  $\mu_1 = \bar{X} + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}$ . 得到  $\bar{X} = 2.125$ ,  $S = 0.0171$ , 即  $\mu_0 = 2.125 - 1.7531 \cdot \frac{0.0171}{\sqrt{16}} = 2.1175$ ,  $\mu_1 = 2.1325$ . [2.1175, 2.1325]

25. 甲乙两位化验员独立地对一种聚合物的含氯量用相同的方法各做了 10 次测定, 得  $s^2 = 0.5419$ ,  $s_2^2 = 0.6050$ . 求他们测定值得方差比得双侧 90% 置信区间, 假定测定值服从正态分布.

**Sol:** 两个正态总体下  $\mu_1, \mu_2$  未知, 随机变量  $J = \frac{s_1^2/\sigma_1^2}{s_2^2/\sigma_2^2}$  服从  $F(m-1, n-1)$  分布, 因此, 取  $\alpha = 0.1$ , 则  $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \in [k_0, k_1]$ ,  $k_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)}$ ,  $k_1 = \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)}$ .  
得到,  $k_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)} = \frac{0.5419}{0.6050} \cdot \frac{1}{F_{0.95}(9, 9)} = 0.2818$ ,  
 $k_1 = \frac{s_1^2}{s_2^2} \cdot \frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(m-1, n-1)} = \frac{0.5419}{0.6050} \cdot \frac{1}{F_{0.05}(9, 9)} = 2.8471$ .  
[0.2818, 2.8471]

26. 设从某种型号的一大批晶体管中随机抽取 100 只样品, 测得其寿命标准差  $s = 45$  小时, 求这批晶体管寿命标准差  $\sigma$  得双侧 95% 置信区间.

**Sol:** 根据辛钦中心极限定理, 设随机变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立, 服从同一分布且有有限的数学期望  $\mu$  和方差  $\sigma^2$ , 则随机变量  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ , 满足  $\bar{x} \sim N(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$ . 一个正态总体在  $\mu$  未知时,  $J = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$  服从  $\chi^2(n-1)$  分布, 则有  $\sigma^2 \in [\sigma_0^2, \sigma_1^2]$ .  $\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}$ ,  $\sigma_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}$ , 得到  $\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)} = \frac{99 \cdot 45^2}{\chi_{0.975}^2(99)} \approx 1561.1$ , 同理可得  $\sigma_1^2 \approx 2732.7$ , 即  $\sigma^2 \in [1561.1, 2732.7]$ . 因此标准差的 90% 置信区间为: [39.51, 52.28].

## 1.7 第 7 次作业

27. 求可逆矩阵  $P$  使  $P^{-1}AP$  为 *Jordan* 矩阵, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

$$\text{Sol: } |A - \lambda I| = \begin{vmatrix} 5-\lambda & 3 & 0 & 1 \\ -1 & 1-\lambda & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 2-\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2-\lambda \end{vmatrix} = (\lambda-2)^3(\lambda-4)$$

可知矩阵  $A$  的特征值为  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 2, \lambda_4 = 4$ .

$$\text{当 } \lambda = 4 \text{ 时, } A - 4I = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 0 & 1 \\ -1 & -3 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}, \text{ 得到其中一个基础解系}$$

$x_1 = [-3 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ , 它是  $A$  属于特征值 4 的特征向量;

$$\text{当 } \lambda = 2 \text{ 时, 考虑线性方程组 } (A-2I)x = y, \text{ 即 } \begin{bmatrix} 3 & 3 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}$$

由于  $r = (A-2I) = 3$ , 所以特征值 2 的几何重数时  $4-3=1$ . 对增广矩阵实施初等行变换, 解得  $x_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ . 将  $y = x_2$  代入  $(A-2I)x = y$

解得任意一个解  $x_3 = [-\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ 1 \ 0]^T$ . 令  $y = x_3$  任取一个解  $x_4 = [-\frac{3}{4} \ \frac{1}{4} \ 0 \ 1]^T$ , 此时  $x_1, x_2, x_3, x_4$  线性无关.

$$\text{令 } P = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = \begin{bmatrix} -3 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{3}{4} \\ 1 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{则有 } AP = P \begin{bmatrix} 4 & & & \\ & 2 & 1 & \\ & & 2 & 1 \\ & & & 2 \end{bmatrix}, \text{ 由于 } |P| \neq 0, P^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{4} \\ -1 & -3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

28. 求  $A^k$  ( $k$  是正整数), 其中

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 2 & -1 \\ 2 & 2 & -1 \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}.$$

**Sol:**  $|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} 3-\lambda & 1 & -1 \\ 2 & 2-\lambda & -1 \\ 2 & 2 & -\lambda \end{vmatrix} = -(\lambda-2)^2(\lambda-1)$  可知矩阵  $A$  的

特征值为  $\lambda_1 = \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 1$ .

当  $\lambda = 1$  时, 由于  $(A - I)x_1 = 0$ , 得到其中一个基础解系  $x_1 = [1 \ 0 \ 2]^T$ , 它是  $A$  属于特征值 1 的特征向量.

当  $\lambda = 2$  时, 由于  $r(A - 2I) = 2$ , 所以特征值 2 的几何重数时  $3-2=1$ .  $(A - 2I)x_2 = 0$ , 得到其中一个基础解系  $x_2 = [1 \ 1 \ 2]^T$ , 它是  $A$  属于特征值 2 的特征向量; 将  $y = x_2$  代入  $(A - 2I)x = y$  解得任意一个解  $x_2 = [\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ 0]^T$ .

$$P = [x_1 \ x_2 \ x_3] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}, P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

$$\text{由于 } A = P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} P^{-1},$$

$$\text{因此 } A^k = P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}^k P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 + k2^k & 2^k - 1 & 2^k - 1 & -k2^k - 1 \\ k2^k & 2^k & -k2^k - 1 & \\ 2 - (k-1)2^{2^k-1} & 2^{k+1} - 2 & (1-k)2^k & \end{bmatrix}.$$

29. 求  $g(A) = a^8 - 9A^6 + A^4 - 3A^3 + 4A^2 + I$ , 其中

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -2 \\ -1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

**Sol:** 方阵  $A$  的特征多项式为, 为  $f(\lambda) = |A - \lambda I| = \begin{vmatrix} 2-\lambda & -1 & -2 \\ -1 & 2-\lambda & 2 \\ 0 & 0 & 1-\lambda \end{vmatrix} =$

$$-(\lambda-1)^2(\lambda-3)$$

且  $g(A)$  对应的特征多项式  $g(\lambda) = \lambda^8 - 9\lambda^6 + \lambda^4 - 3\lambda^3 + 4\lambda^2 + 1$ .  $g(\lambda)$  除以  $f(\lambda)$  得到表达式  $g(\lambda) = q(\lambda)f(\lambda) + r(\lambda)$ , 其中  $q(\lambda)$  和  $r(\lambda)$  都是多项式, 且余式  $r(\lambda)$  的次数至少比  $f(\lambda)$  的次数低 1 次. 即  $r(\lambda) = a_0\lambda^2 + a_1\lambda + a_2$ . 代入得到  $g(\lambda) = q(\lambda)f(\lambda) + a_0\lambda^2 + a_1\lambda + a_2$ .



将特征值 1, 3 分别代入, 得  $a_0 + a_1 + a_2 = g(1) = -5$ ,  $9a_0 + 3a_1 + a_2 = g(3) = 37$ . 又  $g'(\lambda) = q'(\lambda)f(\lambda) + q(\lambda)f'(\lambda) + 2a_0\lambda + a_1$ , 有  $g'(1) = 2a_0 + a_1 = -43$ , 解得

$$\begin{cases} a_0 = 32 \\ a_1 = -107 \\ a_2 = 70 \end{cases}$$

因为  $f(\lambda)$  是  $A$  的零化多项式, 得

$$g(A) = r(A) = 32A^2 - 107A + 70I = \begin{bmatrix} 16 & -21 & -42 \\ -21 & 16 & 42 \\ 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

30. 求下列方阵得最小多项式:

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 & 1 \\ -4 & -1 & -1 & 1 \\ & 2 & 1 & \\ & -1 & 0 & \end{bmatrix}.$$

**Sol:**  $\det(A - \lambda I) = (\lambda - 1)^4$ , 故  $A$  得最小多项式的形式是  $f(\lambda) = (\lambda - 1)^n, n \in [1, 4]$ ,

$$(A - I) = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 1 & 1 \\ -4 & -2 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \neq O, (A - I)^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & -4 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \neq O,$$

$$(A - I)^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \neq O, (A - I)^4 = O, \text{ 因此 } A \text{ 的最小多项式是}$$

$$f(\lambda) = (\lambda - 1)^4.$$

## 1.8 第 8 次作业

31. 从两批电子元件中随机抽取一些样品, 测得它们的电阻 (单位: 欧姆) 如下:

甲批: 0.140; 0.138; 0.143; 0.142; 0.144; 0.137;

乙批: 0.135; 0.140; 0.142; 0.136; 0.138; 0.140;

假定这两批电子元件的电阻都服从正态分布, 问在显著性水平 0.05 下, 能否认为这两个正态总体的方差相等?

**Sol:** 由所给数据可得  $\bar{x} = 0.1407$ ,  $\bar{y} = 0.1385$ ,  $s_1^2 \approx 7.867 \times 10^{-6}$ ,  $s_2^2 = 7.1 \times 10^{-6}$ .

得到检验假设  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ,  $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ .

应用 F 检验, 得到检验统计量的观测值为  $\frac{s_1^2}{s_2^2} = 1.108$ , 而在显著水平  $\alpha = 0.05$  下,  $F_{0.975}(5, 5) = 7.1464$ ,  $F_{0.025}(5, 5) = F_{0.975}^{-1}(5, 5) = 0.1399$ . 显然  $0.1399 < 1.108 < 7.1464$ , 所以不能拒绝  $H_0$ , 可以认为这两个正态总体的方差相等。

32. 电话交换台每分钟接到互换的次数服从 Poisson 分布  $P(\lambda)$ , 今观测了 100 个时段, 每个时段一分钟, 共有 585 次呼唤, 问在显著性水平 0.10 下, 能否认为该电环交换台每分钟接到互换的次数服从  $\lambda = 6$  的 Poisson 分布?

**Sol:** 检验假设  $H_0: \lambda = 6$ ,  $H_1: \lambda \neq 6$ .

根据泊松分布, 检验统计量的观测值为  $\bar{x} = 5.85$ , 由于  $n = 100$  较大, 所以近似地有:  $\sqrt{n} \frac{\bar{x} - E(x)}{s} \sim N(0; 1)$

由 Poisson 分布性质可得,  $E(x) = \lambda$ ,  $s = \sqrt{\lambda}$ , 因此检验统计量观测值为:  $\sqrt{100} \frac{5.85 - 6}{\sqrt{6}} \approx 0.6124$ , 又因为  $\alpha = 0.1$ , 因此  $1 - \frac{\alpha}{2} = u_{0.95} \approx 1.645$ , 显然  $1.645 > 0.6124$ , 所以不能拒绝  $H_0$ . 即可以认为服从  $\lambda = 6$  的 Poisson 分布。

33. 设  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  是取自正态总体  $N(\mu; 1)$  的样本, 其中  $\mu$  未知, 要检验假设

$$H_0: \mu \geq 0; H_1: \mu < 0$$

在显著性水平  $\alpha$  下, 采用拒绝域为

$$W_1 = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | \sqrt{n} \cdot \bar{x} < -u_{1-\alpha}\}$$

的  $\mu$  检验。

(1) 求这个  $u$  检验的功效函数  $\beta(\mu)$

(2) 当  $\alpha = 0.05$  时, 如果要求  $\mu \leq -0.1$  时, 这个  $u$  检验的 II 类风险不大于 0.05, 那么样本容量  $n$  至少应取多大?

**Sol:**

(1) 该检验得功效函数为

$$\begin{aligned}\beta(\mu) &= P_\mu\{(X_1, X_2, \dots, X_n) \in W_1\} \\ &= P_\mu\{\sqrt{n} \cdot \bar{X} < -\mu_{1-\alpha}\} \\ &= P_\mu\{\sqrt{n} \cdot (\bar{X} - \mu) < -\mu_{1-\alpha} - \sqrt{n} \cdot \mu\}\end{aligned}$$

由于  $\bar{X} \sim N(\mu; \frac{1}{n})$ , 故  $\sqrt{n}(\bar{X} - \mu) \sim N(0; 1)$ , 所以记  $\Phi(x)$  为标准正态分布  $N(0; 1)$  的分布函数, 则有

$$\beta(\mu) = 1 - \Phi(u_{1-\alpha} + \sqrt{n} \cdot \mu), \mu \in \Theta = \{\mu_0; \mu_1\}.$$

(2) 依题意  $1 - \beta(\mu) \leq 0.05$ , 则  $\Phi(u_{1-\alpha} + \sqrt{n} \cdot \mu) \geq 1 - \beta(\mu)$ ,  $\sqrt{n} \geq \frac{u_{1-\alpha} + \Phi^{-1}(1 - \beta(\mu))}{\mu} = \frac{u_{0.95} + u_{0.95}}{0.1} \approx 32.898, n \geq 32.898^2 \approx 1082.28$ , 即样本数量至少为 **1083** 个。

## 1.9 第 9 次作业

34. 验证  $A = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}i & -4 \\ 4 & \sqrt{2}i \end{bmatrix}$  是正规矩阵, 并求酉矩阵  $U$  使得  $U^{-1}AU$  为对角矩阵.

**Sol:** 因为  $A^H A = \begin{bmatrix} 18 & \\ & 18 \end{bmatrix} = A A^H$ , 所以  $A$  是正规矩阵.

根据 Schur 定理, 存在酉矩阵  $U$  使  $U^{-1}AU$  为对角矩阵. 由  $|A - \lambda I| = 0$  算出特征值  $\lambda_1 = 3\sqrt{2}i$ ,  $\lambda_2 = -3\sqrt{2}i$ . 对应特征值  $3\sqrt{2}i$  的特征向量  $\varepsilon_1 =$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}, \text{ 以 } \varepsilon_1 \text{ 为第一列的一个酉矩阵可取为 } U = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i & -\sqrt{2} \\ \sqrt{2} & -i \end{bmatrix}$$

$$\text{可以验证 } U^{-1}AU = \begin{bmatrix} 3\sqrt{2}i & \\ & -3\sqrt{2}i \end{bmatrix}.$$

35. 求  $A = \begin{bmatrix} 1+i & 3 \\ 2 & 1-i \end{bmatrix}$  的谱半径  $\rho(A)$ .

**Sol:** 由  $|A - \lambda I| = 0$  算出特征值  $\lambda_1 = 1 + \sqrt{5}$ ,  $\lambda_2 = 1 - \sqrt{5}$ .

于是  $S_p(A) = \{1 - \sqrt{5}, 1 + \sqrt{5}\}$ , 所以  $\rho(A) = 1 + \sqrt{5}$ .

36. 用 Gauss 消去法和列主元消去法求解

$$\begin{cases} 4x_1 - 1.24x_2 + 0.3x_3 = -11.04, \\ 2x_1 + 4.5x_2 + 0.36x_3 = 0.02, \\ 0.5x_1 + 1.1x_2 + 3.1x_3 = 6. \end{cases}$$

**Sol:** 根据题意，方程组的增广矩阵为

$$\begin{bmatrix} 4 & -1.24 & 0.3 & -11.04 \\ 2 & 4.5 & 0.36 & 0.02 \\ 0.5 & 1.1 & 3.1 & 6 \end{bmatrix}$$

通过高斯消去法得

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 4 & -1.24 & 0.3 & -11.04 \\ 2 & 4.5 & 0.36 & 0.02 \\ 0.5 & 1.1 & 3.1 & 6 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow & \begin{bmatrix} 4 & -1.24 & 0.3 & -11.04 \\ 0 & 5.12 & 0.21 & 5.54 \\ 0 & 1.26 & 3.062 & 7.38 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow & \begin{bmatrix} 4 & -1.24 & 0.3 & -11.04 \\ 0 & 5.12 & 0.21 & 5.54 \\ 0 & 0 & 3.001 & 6.017 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

回代求解得到

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{6.017}{3.011} = 2 \\ x_2 &= \frac{5.54 - 0.21x_3}{5.12} = 1 \\ x_1 &= \frac{-11.04 - 0.3x_3 + 1.24x_2}{4} = -2.6 \end{aligned}$$

## 1.10 第 10 次作业

37. 求下列方阵  $A$  的函数  $e^A$  和  $e^{At}$ :

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

**Sol:**  $|A - \lambda I| = -(\lambda + 1)^2(\lambda - 4) = 0$ , 得特征值  $\lambda_1 = \lambda_2 = -1, \lambda_3 = 4$ , 对应的  $\lambda_1, \lambda_2$  得特征向量为  $[1, 0, -1]^T, [\frac{4}{7}, -\frac{5}{7}, 0]^T$ , 对应的  $\lambda_3$  的特征向量为  $[3, 0, 2]^T$ .

则  $P = \begin{bmatrix} 3 & 1 & \frac{4}{7} \\ 0 & 0 & -\frac{5}{7} \\ 2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $P^{-1} = -\frac{1}{25} \begin{bmatrix} 5 & 4 & 5 \\ 10 & 8 & -15 \\ 0 & -35 & 0 \end{bmatrix}$ . 于是, 有  $A =$

$P \begin{bmatrix} 4 & & \\ & -1 & 1 \\ & & -1 \end{bmatrix} P^{-1}$ , 因此

$$e^A = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 3 & 1 & \frac{4}{7} \\ 0 & 0 & -\frac{5}{7} \\ 2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^4 & & \\ & e^{-1} & e^{-1} \\ & & e^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 4 & 5 \\ 10 & 8 & -15 \\ 0 & -35 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 15e^4 + 10e^{-1} & 12e^4 - 47e^{-1} & 15e^4 - 15e^{-1} \\ 0 & 25e^{-1} & 0 \\ 10e^4 - 10e^{-1} & 8e^4 + 27e^{-1} & 10e^4 + 15e^{-1} \end{bmatrix}$$

$$e^{At} = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 3 & 1 & \frac{4}{7} \\ 0 & 0 & -\frac{5}{7} \\ 2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{4t} & & \\ & e^{-t} & te^{-t} \\ & & e^{-t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 4 & 5 \\ 10 & 8 & -15 \\ 0 & -35 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 15e^{4t} + 10e^{-t} & 12e^{4t} - (12 + 35t)e^{-t} & 15e^{4t} - 15e^{-t} \\ 0 & 25e^{-t} & 0 \\ 10e^{4t} - 10e^{-t} & 8e^{4t} - (8 - 35t)e^{-t} & 10e^{4t} + 15e^{-t} \end{bmatrix}$$

38. 证明:  $A = \begin{bmatrix} 4 & -1 & 1 \\ -1 & 4.25 & 2.75 \\ 1 & 2.75 & 3.5 \end{bmatrix}$  是正定矩阵, 并求它的  $LDL^T$  分解

和 *Cholesky* 分解.

**Sol:** 因为  $\Delta_1 = 4 > 0$ ,  $\Delta_2 = 16 > 0$ ,  $\Delta_3 = 16 > 0$ , 所以  $A$  是正定矩阵. 根据  $A = LDL^T = \begin{bmatrix} 1 & & \\ l_{21} & 1 & \\ l_{31} & l_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & & \\ & d_2 & \\ & & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_{21} & l_{31} \\ & 1 & l_{32} \\ & & 1 \end{bmatrix}$ , 可解得

$$\begin{cases} d_1 = 4, \\ l_{21} = -\frac{1}{4}, \\ l_{31} = \frac{1}{4}, \\ d_2 = 4, \\ l_{32} = \frac{3}{4}, \\ d_3 = 1 \end{cases}$$

即得到

$$A = LDL^T = LD^{\frac{1}{2}}D^{\frac{1}{2}}L^T = GG^T$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 1 & & \\ -\frac{1}{4} & 1 & \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 & & \\ & 4 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ & 1 & \frac{3}{4} \\ & & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & & \\ -\frac{1}{4} & 1 & \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & & \\ & 2 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ & 1 & \frac{3}{4} \\ & & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 2 & & \\ -\frac{1}{2} & 2 & \\ \frac{1}{2} & \frac{3}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & & \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \\ & 2 & \frac{3}{2} \\ & & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

39. 设

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & 3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

证明方程组  $Ax = b$  有解, 并用 QR 分解方法解方程组  $Ax = b$ .

**Sol:** 因为  $r([A|b]) = r(A) = 3$ , 因此方程组  $Ax = b$  有解.

有  $A_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 2]^T$ ,  $A_2 = [1 \ 2 \ 1 \ 3]^T$ ,  $A_3 = [2 \ 1 \ 3 \ 3]^T$ ,

$$\beta_1 = A_1, \varepsilon_1 = \frac{1}{\sqrt{7}}[1 \ 1 \ 1 \ 2]^T, \beta_2 = A_2 - (A_2, \varepsilon_1)\varepsilon_1 = \frac{1}{7}[-3 \ 4 \ -3 \ 1]^T, \varepsilon_2 = \frac{\sqrt{35}}{35}[-3 \ 4 \ -3 \ 1]^T, \beta_3 = A_3 - (A_3, \varepsilon_1)\varepsilon_1 - (A_3, \varepsilon_2)\varepsilon_2 = \frac{1}{5}[-2 \ 1 \ 3 \ -1]^T, \varepsilon_3 = \frac{\sqrt{15}}{15}[-2 \ 1 \ 2 \ -1]^T,$$

QR 分解得到

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{7}} & -\frac{3}{\sqrt{35}} & -\frac{3}{\sqrt{15}} \\ \frac{1}{\sqrt{7}} & \frac{4}{\sqrt{35}} & \frac{1}{\sqrt{15}} \\ \frac{1}{\sqrt{7}} & \frac{1}{\sqrt{35}} & \frac{1}{\sqrt{15}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{7} & \frac{10\sqrt{7}}{7} & \frac{12\sqrt{7}}{7} \\ \frac{7}{\sqrt{35}} & -\frac{8\sqrt{35}}{7} & \frac{35}{\sqrt{15}} \\ \frac{7}{\sqrt{35}} & \frac{35}{\sqrt{15}} & \frac{5}{\sqrt{15}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} Qy = b \\ Rx = y \end{cases}, \begin{cases} y = Q^{-1}b, \\ x = R^{-1}y = R^{-1}Q^{-1}b \end{cases}$$

解得  $x = [-1, 0, 1]^T$

40. 求矩阵  $A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$  的奇异值及奇异值分解.

**Sol:** 由于  $A^T A = \begin{bmatrix} 5 & 2 \\ 2 & 5 \end{bmatrix}$  的特征值为  $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = 7$ , 故  $A$  的奇异值

为  $\sqrt{3}, \sqrt{7}$ . 其中,  $A^T A$  属于特征值 3 的单位特征向量为  $v_1 = [\frac{\sqrt{2}}{2} \ -\frac{\sqrt{2}}{2}]^T$ ,

属于特征值 7 的单位特征向量为  $v_2 = [\frac{\sqrt{2}}{2} \ \frac{\sqrt{2}}{2}]^T$ .

$$V = [v_1 | v_2] = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_1 = Av_1 \Sigma_1^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} [\sqrt{3}]^{-1} = \frac{\sqrt{6}}{6} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{同理可得 } U_2 = Av_2 \Sigma_2^{-1} = \frac{\sqrt{14}}{14} \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$U = [U_1 | U_2] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{3}{\sqrt{14}} \\ -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{14}} \end{bmatrix}$$

可验证得到  $U^H A V = \begin{bmatrix} \sqrt{3} & \\ & \sqrt{7} \end{bmatrix}$

因此

$$A = U \begin{bmatrix} \sqrt{3} & \\ & \sqrt{7} \end{bmatrix} V^T = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{3}{\sqrt{14}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{14}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & \\ & \sqrt{7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

### 1.11 第 11 次作业

41. 已知  $\mathbb{R}^3$  的两个基

$$\mathcal{R}_1 = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}, \quad \mathcal{R}_2 = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}.$$

- (1) 求  $\mathcal{R}_1$  到  $\mathcal{R}_2$  的基变换矩阵  $\mathbf{P}$ ;
- (2) 求在  $\mathcal{R}_1$ 、 $\mathcal{R}_2$  下有相同坐标的所有向量.

**Sol:**

$$(1) \quad \mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_1 P, \implies \mathbf{P} = \mathcal{R}_1^{-1} \mathcal{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

- (2) 即求  $\mathcal{R}_1 x = \mathcal{R}_2 x, \implies x = \mathcal{R}_1^{-1} \mathcal{R}_2 x$ ,  $\mathbf{x}$  的非零向量解即求矩阵  $P$  关于特征值 1 的特征向量, 若不存在特征值 1 则  $\mathbf{x}$  只有零向量解.

$$\begin{aligned} |\lambda I - P| &= \begin{vmatrix} \lambda - 1 & 0 & -1 \\ 0 & \lambda - 1 & -1 \\ -1 & -2 & \lambda - 2 \end{vmatrix} \\ &= (\lambda - 1)^2(\lambda - 2) - 3(\lambda - 1) \\ &= (\lambda - 1)(\lambda^2 - 3\lambda - 1) \end{aligned}$$

得其中一个特征值为 1,

$$(P - I)x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$



得到一个基础解系  $p = [2, -1, 0]^T$ , 因此在  $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$  下有相同坐标的所有向量为  $[2, -1, 0]^T, k \in \mathbb{R}$ .

42. 已知  $\mathbb{R}^3$  的线性变换  $\mathcal{F}$  在基  $\mathcal{R}_1 = \left\{ \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}$  下的矩阵是

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

求  $\mathcal{F}$  在基  $\mathcal{R}_2 = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} \right\}$  下的矩阵  $\mathbf{B}$ .

**Sol:** 设  $\mathcal{R}_1$  到  $\mathcal{R}_2$  得基变换矩阵为  $\mathbf{P}$ , 则有  $\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_1 \mathbf{P}$ ,

$$\text{解得 } \mathbf{P} = \mathcal{R}_1^{-1} \mathcal{R}_2 = \begin{bmatrix} -3 & -2 & -2 \\ -2 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

$$\text{可得 } \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 0 \\ -4 & 5 & -1 \\ 2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 9 & 6 & 7 \\ -22 & -17 & -22 \\ 9 & 8 & 11 \end{bmatrix}$$

## 1.12 第 12 次作业

43. 利用 Gerschgorin 定理确定方阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 5 & 1 \\ -2 & -1 & 9 \end{bmatrix}$$

的特征值范围. 判断  $\mathbf{A}$  的特征值是否都是实数?

**Sol:**

$\mathbf{A}$  的三个盖氏圆分别为

$$G_1 = \{z \mid |z - 1| \leq 1\}$$

$$G_2 = \{z \mid |z - 5| \leq 2\}$$

$$G_3 = \{z \mid |z - 9| \leq 3\}$$

$G_2, G_3$  相交, 因此  $\lambda_1 \in G_1, \lambda_2, \lambda_3 \in G_2 \cup G_3$ .

对矩阵  $\mathbf{A}^T$  应用圆盘定理. 矩阵  $\mathbf{A}^T$  对应的三个圆盘为

$$G'_1 = \{z \mid |z - 1| \leq 3\}$$

$$G'_2 = \{z \mid |z - 5| \leq 2\}$$

$$G'_3 = \{z \mid |z - 9| \leq 1\}$$

综合分析可知三个特征值属于  $\lambda_1 \in G_1, \lambda_2 \in G_2, \lambda_3 \in G'_3$ , 发现  $G_1, G_2, G_3$  相互独立, 因此可知  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  都为实数, 且特征值的范围为

$$0 \leq \lambda_1 \leq 2, 3 \leq \lambda_2 \leq 7, 8 \leq \lambda_3 \leq 10.$$

44. 已知方程  $x^3 - x^2 - 1 = 0$  在  $x^{(0)} = 1.5$  附近有根, 将方程改写成:

(1)  $x = 1 + \frac{1}{x^2}$ , 对应的迭代算式为  $x^{(k+1)} = 1 + \frac{1}{[x^{(k)}]^2}$ ;

(2)  $x = \sqrt[3]{1+x^2}$ , 对应的迭代算式为  $x^{(k+1)} = \sqrt[3]{1+[x^{(k)}]^2}$ ;

(3)  $x = \frac{1}{\sqrt{x-1}}$ , 对应的迭代算式为  $x^{(k+1)} = \frac{1}{\sqrt{x^{(k)}-1}}$ .

判断上述各种迭代算式在 1.5 附近的收敛性.

**Sol:**

(1)  $\varphi(x) = 1 + x^{-2}, \varphi'(x) = -2x^{-3}, |\varphi'(1.5)| = |-2 \times 1.5^{-3}| \approx 1.78 > 1$ , 该算式在 1.5 附近不收敛.

(2)  $\varphi(x) = (1+x^2)^{\frac{1}{3}}, \varphi'(x) = \frac{2x}{3}(1+x^2)^{-\frac{2}{3}}, |\varphi'(1.5)| \approx 0.456 < 1$ , 该算式在 1.5 附近收敛.

(3)  $\varphi(x) = (x-1)^{-\frac{1}{2}}, \varphi'(x) = -\frac{1}{2}(x-1)^{-\frac{3}{2}}, |\varphi'(1.5)| \approx 1.414 > 1$ , 该算式在 1.5 附近收敛.

### 1.13 第 13 次作业

45. 今有 10 组观测数据如下

$x_i$	0.5	-0.8	0.9	-2.8	6.5	2.3	1.6	5.1	-1.9	-1.5
$y_i$	-0.3	-1.2	1.1	-3.5	4.6	1.8	0.5	2.8	-2.8	0.5

应用正态线性模型  $Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 10$  且  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{10}$  相互独立,

- (1) 求  $\beta_0, \beta_1$  的最小二乘估计;
- (2) 求  $\beta_1$  的置信水平围殴 0.95 的区间估计;
- (3) 在显著水平  $\alpha = 0.01$  下, 假设检验  $H_0 : \beta_1 = 0$ ;
- (4) 计算残差方差  $\hat{\sigma}_e^2$ ;
- (5) 求  $x = 1.2$  时,  $Y$  的双侧 95% 的预测区间.

**Sol:**

- (1) 易知  $\bar{x} = 0.99$ ,  $\bar{y} = 0.35$ ,  $\beta_1 = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2}$ , 因此  $\beta_1 \approx 0.7566$ ,  $\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$ , 因此  $\beta_0 \approx -0.3991$ .

- (2) 由题意可知  $\alpha = 0.05$ , 所求区间为:  $\beta_1 \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-k-1)\hat{\sigma}_e\sqrt{(L^{-1})_{11}}$ , 其中,  $e = y - X\hat{\beta}$ ,  $Q_e = e^T e = 7.5652$ ,  $n-k-1 = 10-1-1 = 8$ , 则  $\hat{\sigma}_e = \sqrt{\frac{Q_e}{n-k-1}} = 0.9724$ ,

$$L^{-1} = (X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 10 & 9 \\ 9.9 & 91.51 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1120 & -0.0121 \\ -0.0121 & 0.0122 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\beta}_1 \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-k-1)\hat{\sigma}_e\sqrt{(L^{-1})_{11}} = 0.7566 \pm t_{0.975}(8) \cdot 0.9724 \cdot 0.1120 = 0.7566 \pm 0.2511, \text{ 因此得到区间为: } [0.5055, 1.0077].$$

- (3) 假设检验  $H_0 : \beta_1 = 0$ .

来源	平方和	自由度	均方和	F 值
回归系数	46.78	1	46.78	49.47
残差	7.5652	8	0.9457	
总和	54.35	9		

在显著性水平  $\alpha = 0.01$  下, 临界值  $F_{1-\alpha}(k, n-k-1) = F_{0.99}(1, 8) = 11.26$ , 由于  $49.47 > 11.26$ , 因此拒绝  $HH_0$ .

(4) 由上表可得  $\hat{\sigma}_e^2 = 0.9457$ .

(5)  $\mathbf{X}_t = [1 \ 1.2]^T$ ,  $\hat{Y}_t = \mathbf{X}_t^T \hat{\beta} = 0.5089$ ,  $Y_t$  的双侧  $1 - \alpha, \alpha = 0.05$  预测区间的上下限为  $\hat{Y}_t \pm \hat{\sigma}_e \sqrt{1 + \mathbf{X}_t^T \mathbf{L}^{-1} \mathbf{X}_t} = 0.5089 \pm 0.9724 \sqrt{1 + 0.1005} \cdot 2.3060 = 0.5089 \pm 2.3523$  则有  $Y$  的双侧 95% 的置信区间为  $[-1.7714, 2.9332]$

46. 养猪场为了估算猪的毛重 (单位: 公斤)  $Y$  与其身长 (单位: 厘米)  $x_1$ , 肚围 (单位: 厘米)  $x_2$  之间的关系, 测量了 14 头猪, 得数据如下:

$x_{i,1}$	41	45	51	52	59	62	69	72	78	80	90	92	98	103
$x_{i,2}$	49	58	62	71	62	74	71	74	79	84	85	94	91	95
$y_i$	28	39	41	44	43	50	51	57	63	66	70	76	80	84

(1) 求经验回归函数;

(2) 在显著水平 1% 下, 检验  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ ;

(3) 求  $x_1 = 100, x_2 = 80$  时  $Y$  的预测值;

(4) 在显著水平 5% 下, 做偏  $F$  检验,  $H_{0j}: \beta_j = 0, j = 1, 2$ .

这里, 假定猪的毛重  $Y \sim N(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \sigma^2)$ .

**Sol:**

(1) 易得  $\bar{x}_{i1} = \frac{496}{14}, \bar{x}_{i2} = \frac{1049}{14}, \bar{y} = \frac{396}{14}, l_{11} = \sum x_{i1}^2 - 14\bar{x}_{i1}^2 = \frac{36762}{14},$   
 $l_{22} = \sum x_{i2}^2 - 14\bar{x}_{i2}^2 = \frac{35713}{14}, l_{12} = l_{21} = \sum x_{i1}x_{i2} - 14\bar{x}_{i1}\bar{x}_{i2} = \frac{24499}{14},$   
 $l_{1y} = \sum x_{i1}y_i - 14\bar{x}_{i1}\bar{y} = \frac{30808}{14}, l_{2y} = \sum x_{i2}y_i - 14\bar{x}_{i2}\bar{y} = \frac{21256}{14}.$

因此  $\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} l_{1y} \\ l_{2y} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.5223 \\ 0.4738 \end{bmatrix}$

且  $\beta_0 = \bar{y} - \sum \beta_j \bar{x}_{ij} \approx -15.9384$ , 因此得到经验回归公式为

$$y = -15.9384 + 0.5223x_1 + 0.4738x_2$$

(2) 检验假设  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$ ,

来源	平方和	自由度	均方和	F 值
回归系数	3737	2	1869	570.5
残差	36.03	11	3.276	
总和	3773	13		

在显著水平  $\alpha = 0.01$  下, 临界值  $F_{1-\alpha}(k, n-k-1) = F_{0.99}(2, 11) = 7.206$ , 由于  $570.5 > 7.206$ , 因此拒绝  $H_0$ .

(3) 由 (1) 的经验回归公式可得  $Y = 15.9384 + 0.5223x_1 + 0.4738x_2 = 74.1956$

(4) 在显著水平 5% 下, 做偏 F 检验,  $H_{0j} : \beta_j = 0, j = 1, 2$ . 由于  $SS_{rj} = \frac{\hat{\beta}_{a_j}^2}{l(jj)}$ , 得  $SS_{r1} = 122.7, SS_{r2} = 49.07, SS_e = 36.03$ , 因此得到统计量  $F_j = \frac{SS_{rj}}{SS_e/(n-k-1)} = \frac{SS_{rj}}{3.276}$ , 则有  $F_1 = 37.45, F_2 = 14.98$ . 而  $F_{0.95}(2, 11) = 3.982, F_j > 3.982$ , 因而拒绝  $H_0 : \beta_j = 0, j = 1, 2$ .

47. 下表给出了某种化工产品在不同浓度 (单位: %) 与四种不同温度 (单位: °C) 下成品的得率, 且每对水平搭配做了两次试验的数据:

浓度 \ 温度	10	24	38	52
2	10, 14	11, 11	13, 9	10, 12
4	9, 7	10, 8	7, 11	6, 10
6	5, 11	13, 14	12, 13	14, 10

假定数据来自方差相等的正态总体.

- (1) 证明: 在显著水平 25% 下, 浓度与温度之间的交互效应对该种化工产品的得率无显著影响.
- (2) 问: 在显著性水平 5% 下, 浓度与温度分别对该种化工产品的得率有无显著影响?

**Sol:**

- (1) 根据表中数据, 可得方差分析表如下

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值
温度	11.5	3	3.8333	0.71	0.5657
浓度	44.333	2	22.1667	4.09	0.0442
交互效应	27	6	4.5	0.83	0.5684
误差	65	12	5.4167		
总和	147.833	23			

根据显著性水平 25% 对照表中  $p$  值 0.5684 可知, 浓度与温度之间的交互效应对该种化工产品的得率无显著影响.

- (2) 从表中可看出, 在显著性 5% 下, 浓度对该种化工产品的得率有显著影响, 与温度则无显著影响.

### 1.14 第 14 次作业

48. 给定数据表

$x_i$	1.2	3.2	4.5
$f_i$	101	112	109

求通过这三个点的次数不超过 2 的插值多项式.

**Sol:**

$$\begin{bmatrix} 1 & 1.2 & 1.44 \\ 1 & 3.2 & 10.24 \\ 1 & 4.5 & 20.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 101 \\ 112 \\ 109 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 85.31 \\ 15.91 \\ -2.366 \end{bmatrix}$$

解得  $y = 85.31 + 15.91x - 2.366x^2$ .

49. 已知数据表

$x$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$y(x)$	0.70010	0.40160	0.10810	-0.17440	-0.43750

用反插值 (即在  $y = y(x)$  的反函数  $x = x(y)$  存在的假设下, 构造反函数  $x = x(y)$  的插值多项式) 求  $y(x) = 0$  在  $(0.3, 0.4)$  内的根的近似值.

**Sol:**

差商表如下:

x(y)	x	一阶差商	二阶差商	三阶差商	四阶差商
0.7001	0.1				
0.4016	0.2	<u>-0.3350</u>			
0.1081	0.3	-0.3407	<u>0.00964</u>		
-0.1744	0.4	-0.3540	0.02303	<u>-0.01531</u>	
0.4375	0.5	-0.3801	0.04784	-0.02956	<u>0.01253</u>

根据牛顿插值多项式

$$x = x(y) = f(y_0) + f[y_0, y_1](y - y_0) + f[y_0, y_1, y_2](y - y_0)(y - y_1) + f[y_0, y_1, y_2, y_3](y - y_0)(y - y_1)(y - y_2) + f[y_0, y_1, y_2, y_3, y_4](y - y_0)(y - y_1)(y - y_2)(y - y_3),$$

因此  $y(x) = 0$  的根的近似值为  $x = x(0) = 0.1 - 0.3350(-0.7001) + 0.00964(-0.7001)(-0.4016) - 0.01531(-0.7001)(-0.4016)(-0.1081) + 0.01253(-0.7001)(-0.4016)(-0.1081)(-0.1744)$

0.3376

50. 已知实验数据表

$x_i$	19	25	31	38	44
$y_i$	19.0	32.3	49.0	73.3	97.8

用最小二乘法求形如  $y = a + bx^2$  的经验公式, 并计算均方误差.

**Sol:**

以  $\varphi_0(x) = 1$ ,  $\varphi_1(x) = x^2$  为基函数, 且

$$y = [19.0 \ 32.3 \ 49.0 \ 73.3 \ 97.8]^T, a = [a \ b]^T, G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 361 & 625 & 961 & 1444 & 1936 \end{bmatrix}^T,$$

$$G^T G = \begin{bmatrix} 5 & 5327 \\ 5327 & 7277699 \end{bmatrix}$$

$$G^T y = \begin{bmatrix} 271.4 \\ 369321.5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 5 & 5327 \\ 5327 & 7277699 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 271.4 \\ 369321.5 \end{bmatrix}$$

解得  $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9726 \\ 0.05004 \end{bmatrix}$

因此  $y = 0.9726 + 0.05004x^2$ , 可计算得误差平方和为  $\sigma^2 = \frac{1}{5} \sum (y - \hat{y})^2 = 0.003039$ .