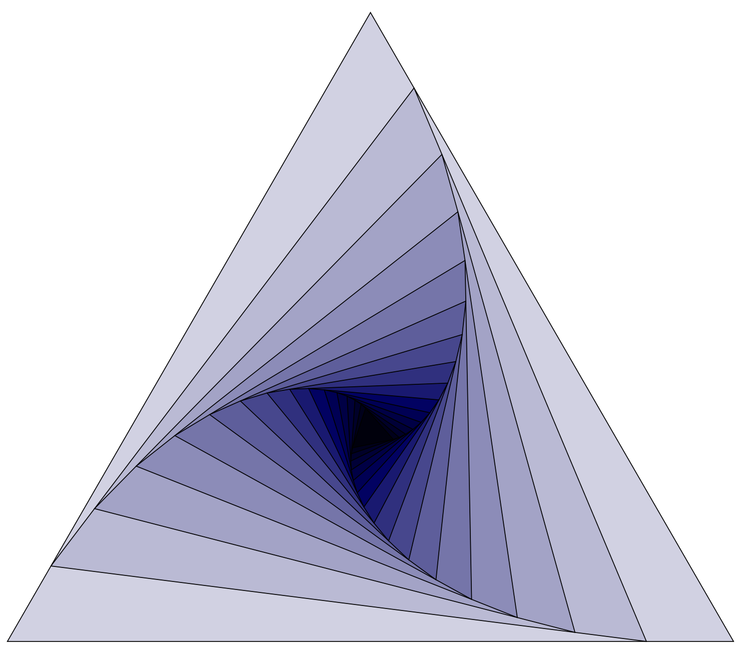
2006-2020 年考研数学三真题解答

向禹 ◎ 著

第一版



yuxtech.github.io

目　次

1　2006 年考研数学三

一　填空题, $1 \sim 6$ 题, 每题 4 分, 共 24 分.

1. $\lim\limits_{n\to\infty}\left(\dfrac{n+1}{n}\right)^{(-1)^n}=$________.

   解　$\lim\limits_{n\to\infty}\left(\dfrac{n+1}{n}\right)^{(-1)^n}=\lim\limits_{n\to\infty}\mathrm{e}^{(-1)^n\ln\left(\frac{n+1}{n}\right)}=\mathrm{e}^0=1.$

2. 设函数 $f(x)$ 在 $x=2$ 的某邻域内可导, 且 $f'(x)=\mathrm{e}^{f(x)}$, $f(2)=1$, 则 $f'''(2)=$________.

   解　等式两边对 x 求导得 $f''(x)=\mathrm{e}^{f(x)}f'(x)=\mathrm{e}^{2f(x)}$, 再次求导得 $f'''(x)=2\mathrm{e}^{2f(x)}f'(x)=2\mathrm{e}^{3f(x)}$, 又 $f(2)=1$, 故 $f'''(2)=2\mathrm{e}^{3f(2)}=2\mathrm{e}^3$.

3. 设函数 $f(u)$ 可微, 且 $f'(0)=\dfrac{1}{2}$, 则 $z=f(4x^2-y^2)$ 在点 $(1,2)$ 处的全微分 $\mathrm{d}z\big|_{(1,2)}=$________.

   解　对 $z=f(4x^2-y^2)$ 两边进行微分得

$$\mathrm{d}z=f'(4x^2-y^2)\,\mathrm{d}(4x^2-y^2)=f'(4x^2-y^2)(8x\,\mathrm{d}x-2y\,\mathrm{d}y),$$

   因此 $\mathrm{d}z\big|_{(1,2)}=f'(0)(8\mathrm{d}x-2\mathrm{d}y)=4\,\mathrm{d}x-2\,\mathrm{d}y$.

4. 设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}2&1\\-1&2\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{E}$ 是二阶单位矩阵, 矩阵 $\boldsymbol{B}$ 满足 $\boldsymbol{BA}=\boldsymbol{B}+2\boldsymbol{E}$, 则 $|\boldsymbol{B}|=$________.

   解　由条件可得

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{E})=2\boldsymbol{E}\Rightarrow|\boldsymbol{B}(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{E})|=|2\boldsymbol{E}|\Rightarrow|\boldsymbol{B}|\,|\boldsymbol{A}-\boldsymbol{E}|=2^2=4,$$

   因为 $|\boldsymbol{A}-\boldsymbol{E}|=\begin{vmatrix}1&1\\-1&1\end{vmatrix}=2$, 所以 $|\boldsymbol{B}|=2$.

5. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且均服从区间 $[0,3]$ 上的均匀分布, 则 $P\big(\max\{X,Y\}\big)\leqslant 1=$________.

   解　$P\big(\max\{X,Y\}\big)\leqslant 1=P(X\leqslant 1,Y\leqslant 1)=P(X\leqslant 1)P(Y\leqslant 1)=\dfrac{1}{3}\cdot\dfrac{1}{3}=\dfrac{1}{9}.$

6. 设总体 X 的概率密度为 $f(x)=\dfrac{1}{2}\mathrm{e}^{-|x|}\,(-\infty<x<+\infty)$, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为总体 X 的简单随机样本, 其样本方差为 S^2, 则 $ES^2=$________.

解 样本方差是总体方差的无偏估计, 即

$$ES^2 = D(X) = EX^2 - (EX)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{2} \mathrm{e}^{-|x|}\,\mathrm{d}x - \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x}{2} \mathrm{e}^{-|x|}\,\mathrm{d}x\right)^2$$
$$= \int_0^{+\infty} x^2 \mathrm{e}^{-x}\,\mathrm{d}x - 0 = 2.$$

二 选择题, 7 ∼ 14 题, 每题 4 分, 共 32 分.

7. 设函数 $y = f(x)$ 具有二阶导数, 且 $f'(x) > 0, f''(x) > 0, \Delta x$ 为自变量 x 在点 x_0 处的增量, Δy 与 $\mathrm{d}y$ 分别为 $f(x)$ 在点 x_0 处对应的增量与微分, 若 $\Delta x > 0$, 则 ( )

A. $0 < \mathrm{d}y < \Delta y$ B. $0 < \Delta y < \mathrm{d}y$ C. $\Delta y < \mathrm{d}y < 0$ D. $\mathrm{d}y < \Delta y < 0$

解 由拉格朗日中值定理知

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + f'(x_0)\Delta x + \frac{1}{2} f''(\xi)(\Delta x)^2 > f(x_0) + f'(x_0)\Delta x,$$

于是 $f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) > f'(x_0)\Delta x > 0, \Delta x > 0$, 即 $0 < \mathrm{d}y < \Delta y$, 选 A.

8. 设函数 $f(x)$ 在 $x = 0$ 处连续, 且 $\lim\limits_{h\to 0} \dfrac{f(h^2)}{h^2} = 1$, 则 ( )

A. $f(0) = 0$ 且 $f'_-(0)$ 存在 B. $f(0) = 1$ 且 $f'_-(0)$ 存在

C. $f(0) = 0$ 且 $f'_+(0)$ 存在 D. $f(0) = 1$ 且 $f'_+(0)$ 存在

9. 若级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛, 则级数 ( )

A. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} |a_n|$ 收敛 B. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$ 收敛

C. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_n a_{n+1}$ 收敛 D. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{a_n + a_{n+1}}{2}$ 收敛

解 由 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_n$ 收敛知 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_{n+1}$ 收敛, 因此 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{a_n + a_{n+1}}{2}$ 收敛, 选 D. 而 A, B, C 均可取反例 $a_n = \dfrac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$.

10. 设非齐次线性微分方程 $y' + P(x)y = Q(x)$ 有两个不同的解 $y_1(x), y_2(x), C$ 为任意常数, 则该方程的通解是 ( )

A. $C[y_1(x) - y_2(x)]$ B. $y_1(x) + C[y_1(x) - y_2(x)]$

C. $C[y_1(x) + y_2(x)]$ D. $y_1(x) + C[y_1(x) + y_2(x)]$

解 $y_1(x) - y_2(x)$ 是对应齐次线性微分方程 $y' + P(x)y = 0$ 的非零解, 则它的通解为 $Y = C[y_1(x) - y_2(x)]$, 故原方程的通解为 $y = y_1(x) + Y = y_1(x) + C[y_1(x) - y_2(x)]$, 选 B.

11.设 $f(x,y)$ 与 $\varphi(x,y)$ 均为可微函数, 且 $\varphi_y'(x,y)\neq 0$. 已知 (x_0,y_0) 是 $f(x,y)$ 在约束条件 $\varphi(x,y)=0$ 下的一个极值点, 下列选项正确的是 ( )

A. 若 $f_x'(x_0,y_0)=0$, 则 $f_y'(x_0,y_0)=0$ B. 若 $f_x'(x_0,y_0)=0$, 则 $f_y'(x_0,y_0)\neq 0$

C. 若 $f_x'(x_0,y_0)\neq 0$, 则 $f_y'(x_0,y_0)=0$ D. 若 $f_x'(x_0,y_0)\neq 0$, 则 $f_y'(x_0,y_0)\neq 0$

解 令 $F(x,y,\lambda)=f(x,y)+\lambda\varphi(x,y)$, 并记对应 x_0,y_0 的参数 λ 的值为 λ_0, 则

$$\begin{cases}F_x'(x_0,y_0,\lambda_0)=0\\F_y'(x_0,y_0,\lambda_0)=0\end{cases},\quad \text{即}\quad \begin{cases}f_x'(x_0,y_0)+\lambda_0\varphi_x'(x_0,y_0)=0\\f_y'(x_0,y_0)+\lambda_0\varphi_y'(x_0,y_0)=0\end{cases},$$

那么当 $f_x'(x_0,y_0)\neq 0$ 时, 必有 $\lambda_0\neq 0,\varphi_x'(x_0,y_0)\neq 0$, 消去 λ_0 得

$$f_x'(x_0,y_0)\varphi_y'(x_0,y_0)-f_y'(x_0,y_0)\varphi_x'(x_0,y_0)=0,$$

注意到 $\varphi_y'(x,y)\neq 0$, 于是 $f_y'(x_0,y_0)\neq 0$, 选 D.

12.设 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 均为 n 维列向量, $\boldsymbol{A}$ 是 $m\times n$ 矩阵, 下列选项正确的是 ( )

A. 若 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 线性相关, 则 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s$ 线性相关

B. 若 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 线性相关, 则 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s$ 线性无关

C. 若 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 线性无关, 则 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s$ 线性相关

D. 若 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 线性无关, 则 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s$ 线性无关

解 注意到 $(\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s)=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s)$, 如果 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s$ 线性相关, 则

$$r(\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s)\leqslant r(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{\alpha}_s)<s,$$

因此 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\cdots,\boldsymbol{A\alpha}_s$ 线性相关, 选 A.

13.设 $\boldsymbol{A}$ 为三阶矩阵, 将 $\boldsymbol{A}$ 的第 2 行加到第 1 行的 $\boldsymbol{B}$, 再将 $\boldsymbol{B}$ 的第 1 列的 -1 倍加到第 2 列得 $\boldsymbol{C}$, 记 $\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$, 则 ( )

A. $\boldsymbol{C}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{AP}$ B. $\boldsymbol{C}=\boldsymbol{PAP}^{-1}$ C. $\boldsymbol{C}=\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{AP}$ D. $\boldsymbol{C}=\boldsymbol{PAP}^{\mathrm{T}}$

解 由初等变换与初等矩阵之间的关系可知

$$B=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\boldsymbol{A},\boldsymbol{C}=\boldsymbol{B}\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\boldsymbol{PAP}^{-1},$$

因此选 B.

14.设随机变量 X 服从正态分布 $N(\mu_1,\sigma_1^2)$, Y 服从正态分布 $N(\mu_2,\sigma_2^2)$, 且 $P\big(|X-\mu_1|<1\big)>P\big(|Y-\mu_2|<1\big)$, 则必有 ( )

A. $\sigma_1 < \sigma_2$ B. $\sigma_1 > \sigma_2$ C. $\mu_1 < \mu_2$ D. $\mu_1 > \mu_2$

解 将 X,Y 标准化, 则 $\dfrac{X-\mu_1}{\sigma_1} \sim N(0,1)$, $\dfrac{Y-\mu_2}{\sigma_2} \sim N(0,1)$, 那么

$$P\left(|X-\mu_1|<1\right) = P\left(\left|\frac{X-\mu_1}{\sigma_1}\right| < \frac{1}{\sigma_1}\right) = \Phi\left(\frac{1}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{\sigma_1}\right) = 2\Phi\left(\frac{1}{\sigma_1}\right) - 1,$$

$$P\left(|Y-\mu_2|<1\right) = 2\Phi\left(\frac{1}{\sigma_2}\right) - 1.$$

因此 $P\left(|X-\mu_1|<1\right) > P\left(|Y-\mu_2|<1\right) \Rightarrow \Phi\left(\dfrac{1}{\sigma_1}\right) > \Phi\left(\dfrac{1}{\sigma_2}\right)$, 所以 $\dfrac{1}{\sigma_1} > \dfrac{1}{\sigma_2}$, 即 $\sigma_1 < \sigma_2$, 选 A.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 7 分)

设 $f(x,y) = \dfrac{y}{1+xy} - \dfrac{1-y\sin\frac{\pi x}{y}}{\arctan x}, x>0, y>0$, 求

(1) $g(x) = \lim\limits_{y\to+\infty} f(x,y)$;

(2) $\lim\limits_{x\to0^+} g(x)$.

解 (1) $g(x) = \lim\limits_{y\to+\infty}\left(\dfrac{y}{1+xy} - \dfrac{1-y\sin\frac{\pi x}{y}}{\arctan x}\right) = \dfrac{1}{x} - \dfrac{1-\pi x}{\arctan x}, x>0.$

(2)

$$\begin{aligned}\lim_{x\to0^+} g(x) &= \lim_{x\to0^+}\left(\frac{1}{x} - \frac{1-\pi x}{\arctan x}\right)\\ &= \lim_{x\to0^+}\frac{\arctan x - x}{x\arctan x} + \lim_{x\to0^+}\frac{\pi x^2}{x\arctan x}\\ &= \lim_{x\to0^+}\frac{-\frac{1}{3}x^3}{x^2} + \lim_{x\to0^+}\frac{\pi x^2}{x^2} = \pi.\end{aligned}$$

16.(本题满分 7 分)

计算二重积分 $\displaystyle\iint_D \sqrt{y^2-xy}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$, 其中 D 是由直线 $y=x, y=1, x=0$ 所围成的平面区域.

解 化为先对 x 后对 y 的累次积分得

$$\begin{aligned}\iint_D \sqrt{y^2-xy}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y &= \int_0^1 \sqrt{y}\mathrm{d}y \int_0^y \sqrt{y-x}\,\mathrm{d}x\\ &= \int_0^1 \sqrt{y}\cdot\left(-\frac{2}{3}(y-x)^{\frac{3}{2}}\right)\Bigg|_{x=0}^{y}\mathrm{d}y\end{aligned}$$

$$= \frac{2}{3}\int_0^1 \sqrt{y}\cdot y^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{d}y = \frac{2}{3}\int_0^1 y^2\,\mathrm{d}y = \frac{2}{9}.$$

17.(本题满分 10 分)

证明: 当 $0 < a < b < \pi$ 时,

$$b\sin b + 2\cos b + \pi b > a\sin a + 2\cos a + \pi a.$$

证 令 $f(x) = x\sin x + 2\cos x + \pi x, x \in (0,\pi)$, 则

$$f'(x) = \sin x + x\cos x - 2\sin x + \pi = x\cos x - \sin x + \pi,\quad f'(\pi) = 0,$$
$$f''(x) = \cos x + x\sin x - \cos x = -x\sin x < 0,$$

因此当 $x \in (0,\pi)$ 时, $f'(x)$ 单调递减, $f'(x) > f'(\pi) = 0$, 则 $f(x)$ 单调增加, 于是当 $0 < a < b < \pi$ 时, $f(b) > f(a)$, 即

$$b\sin b + 2\cos b + \pi b > a\sin a + 2\cos a + \pi a.$$

18.(本题满分 8 分)

在 xOy 坐标平面上, 连续曲线 L 过点 $M(1,0)$, 其上任意点 $P(x,y)\ (x \neq 0)$ 处的切线斜率与直线 OP 的斜率之差等于 ax (常数 $a > 0$).

(1) 求 L 的方程;

(2) 当 L 与直线 $y = ax$ 所围成平面图形的面积为 $\frac{8}{3}$ 时, 确定 a 的值.

解 (1) 设曲线 L 的方程为 $y = f(x)$, 由题意得

$$y' - \frac{y}{x} = ax,$$

因此 $\left(\frac{y}{x}\right)' = \frac{xy' - y}{x^2} = a$, $\frac{y}{x} = ax + C$, $y = ax^2 + Cx$. 再由 $f(1) = 0$ 知 $C = -a$, 故曲线 L 的方程为 $y = ax^2 - ax\ (x \neq 0)$.

(2) 曲线 L 与直线 $y = ax\ (a > 0)$ 所围成的平面图形的面积为

$$S = \int_0^2 |ax - (ax^2 - ax)|\,\mathrm{d}x$$
$$= a\int_0^2 (2x - x^2)\,\mathrm{d}x = \frac{4}{3}a = \frac{8}{3} \Rightarrow a = 2.$$

19.(本题满分 10 分)

求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}x^{2n+1}}{n(2n-1)}$ 的收敛域及和函数.

解 记 $u_n(x)=\dfrac{(-1)^{n+1}x^{2n+1}}{n(2n-1)}$, 则

$$\lim_{n\to\infty}\left|\frac{u_{n+1}(x)}{u_n(x)}\right|=\lim_{n\to\infty}\frac{x^{2n+3}}{(n+1)(2n+1)}\Big/\frac{x^{2n+1}}{n(2n-1)}=x^2,$$

令 $x^2<1$ 得 $-1<x<1$, 即幂级数的收敛区间为 $(-1,1)$. 当 $x=\pm1$ 时, 对应的级数也收敛, 因此收敛域为 $[-1,1]$. 设幂级数的和函数为 $S(x)$, 当 $x\in(-1,1)$ 时,

$$S(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}x^{2n+1}}{n(2n-1)}=2x\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}x^{2n}}{(2n-1)(2n)}=2xS_1(x),$$

而

$$S_1'(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}x^{2n-1}}{2n-1}=\arctan x,\ S_1(0)=0,$$

因此

$$\begin{aligned}S_1(x)&=\int_0^x S'(t)\,\mathrm{d}t=\int_0^x\arctan t\,\mathrm{d}t\\&=t\arctan t\Big|_0^x-\int_0^x\frac{t}{1+t^2}\,\mathrm{d}t=x\arctan x-\frac{1}{2}\ln(1+x^2).\end{aligned}$$

由于级数在 $x=\pm1$ 处收敛, 则 $S(x)$ 在 $x=\pm1$ 处均连续, 所以

$$S(x)=2xS_1(x)=2x^2\arctan x-x\ln(1+x^2),x\in[1,1].$$

20.(本题满分 13 分)

设 4 维向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1=(1+a,1,1,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_2=(2,2+a,2,2)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_3=(3,3,3+a,3)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_4=(4,4,4,4+a)^{\mathrm{T}}$. 问 a 为何值时, $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 线性相关? 当 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 线性相关时, 求其一个极大线性无关组, 并将其余向量用该极大线性无关组线性表出.

解 记以 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 为列向量的矩阵为 $\boldsymbol{A}$, 则

$$|\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}1+a&2&3&4\\1&2+a&3&4\\1&2&3+a&4\\1&2&3&4+a\end{vmatrix}=(10+a)a^3.$$

于是当 $|\boldsymbol{A}|=0$ 即 $a=0$ 或 $a=-10$ 时, $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 线性相关.

当 $a=0$ 时, 显然 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 是一个极大无关组, 且 $\boldsymbol{\alpha}_2=2\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3=3\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_4=4\boldsymbol{\alpha}_1$.

当 $a=-10$ 时,

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}-9&2&3&4\\1&-8&3&4\\1&2&-7&4\\1&2&3&-6\end{pmatrix},$$

由于此时 $\boldsymbol{A}$ 有三阶非零子式 $\begin{vmatrix} -9 & 2 & 3 \\ 1 & -8 & 3 \\ 1 & 2 & -7 \end{vmatrix} = -400$, 所以 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\alpha}_3$ 为极大无关组, 且 $\boldsymbol{\alpha}_1 + \boldsymbol{\alpha}_2 + \boldsymbol{\alpha}_3 + \boldsymbol{\alpha}_4 = \mathbf{0}$, 即 $\boldsymbol{\alpha}_4 = -\boldsymbol{\alpha}_1 - \boldsymbol{\alpha}_2 - \boldsymbol{\alpha}_3$.

21.(本题满分 13 分)

设 3 阶实对称矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的各行元素之和均为 3, 向量 $\boldsymbol{\alpha}_1 = (-1, 2, -1)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\alpha}_2 = (0, -1, 1)^{\mathrm{T}}$ 是线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \mathbf{0}$ 的两个解.

(1) 求 $\boldsymbol{A}$ 的特征值与特征向量;

(2) 求正交矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 与对角矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$, 使得 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{\Lambda}$;

(3) 求 $\boldsymbol{A}$ 及 $\left(\boldsymbol{A} - \dfrac{3}{2}\boldsymbol{E}\right)^6$, 其中 $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵.

解 (1) 因为 $\boldsymbol{A}$ 的各行元素之和为 3, 即有

$$\boldsymbol{A}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} = 3\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix},$$

所以 3 是矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值, $\boldsymbol{\alpha} = (1, 1, 1)^{\mathrm{T}}$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的属于 3 的特征向量. 又根据题意, $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2$ 是矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的属于 $\lambda = 0$ 的两个线性无关的特征向量, 因此矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值是 $3, 0, 0$.

特征值 $\lambda = 3$ 的特征向量为 $k(1, 1, 1)^{\mathrm{T}}, k \neq 0$;

特征值 $\lambda = 0$ 的特征向量为 $k_1(-1, 2, -1)^{\mathrm{T}} + k_2(0, -1, 1)^{\mathrm{T}}, k_1, k_2$ 不全为零.

(2) 先对 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2$ 进行斯密特正交化,

$$\boldsymbol{\beta}_1 = \boldsymbol{\alpha}_1 = (-1, 2, -1)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{\beta}_2 = \boldsymbol{\alpha}_2 - \frac{(\boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\beta}_1)}{(\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_1)}\boldsymbol{\beta}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} - \frac{-3}{6}\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

单位化得 $\boldsymbol{\gamma}_1 = \dfrac{1}{\sqrt{6}}\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\gamma}_2 = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\gamma}_3 = \dfrac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, 令

$$\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{\gamma}_1, \boldsymbol{\gamma}_2, \boldsymbol{\gamma}_3) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}, \boldsymbol{\Lambda} = \begin{pmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & 3 \end{pmatrix},$$

则 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{\Lambda}$.

(3) 由 (2) 知 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{\Lambda}$, 那么 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{A}-\frac{3}{2}\boldsymbol{E}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{\Lambda}-\frac{3}{2}\boldsymbol{E}\right)\boldsymbol{Q}$, 则

$$\begin{aligned}\left(\boldsymbol{A}-\frac{3}{2}\boldsymbol{E}\right)^6&=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{\Lambda}-\frac{3}{2}\boldsymbol{E}\right)^6\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}-\frac{3}{2}&&\\&-\frac{3}{2}&\\&&\frac{3}{2}\end{pmatrix}^6\boldsymbol{Q}\\&=\left(\frac{3}{2}\right)^6\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{Q}=\left(\frac{3}{2}\right)^6\boldsymbol{E}.\end{aligned}$$

22.(本题满分 13 分)

随机变量 X 的概率密度为 $f_X(x)=\begin{cases}\frac{1}{2}, & -1<x<0\\ \frac{1}{4}, & 0\leqslant x<2\\ 0 & 其他\end{cases}$, 令 $Y=X^2$, $F(x,y)$ 为二维随机变量 (X,Y) 的分布函数, 求:

(1) Y 的概率密度 $f_Y(y)$;

(2) $\mathrm{Cov}(X,Y)$;

(3) $F\left(-\frac{1}{2},4\right)$.

解 (1) Y 的分布函数为 $F_Y(y)=P(Y\leqslant y)=P(X^2\leqslant y)$. 当 $y\leqslant 0$ 时, $F_Y(y)=0$. 当 $0<y<1$ 时,

$$\begin{aligned}F_Y(y)&=P\left(-\sqrt{y}\leqslant X\leqslant\sqrt{y}\right)=P\left(-\sqrt{y}\leqslant X<0\right)+P\left(0\leqslant X\leqslant\sqrt{y}\right)\\&=\frac{1}{2}\sqrt{y}+\frac{1}{4}\sqrt{y}=\frac{3}{4}\sqrt{y}.\end{aligned}$$

当 $y\geqslant 4$ 时, $F_Y(y)=1$, 因此 Y 的概率密度 $f_Y(y)=F_Y'(y)=\begin{cases}\frac{3}{8\sqrt{y}}, & 0<y<1\\ \frac{1}{8\sqrt{y}}, & 1\leqslant y<4\\ 0, & 其他\end{cases}$.

(2) $\mathrm{Cov}(X,Y)=\mathrm{Cov}(X,X^2)=E(X^3)-E(X)E(X^2)$, 其中

$$E(X)=\int_{-1}^0\frac{x}{2}\,\mathrm{d}x+\int_0^2\frac{x}{4}\,\mathrm{d}x=\frac{1}{4},\ E(X^2)=\int_{-1}^0\frac{x^2}{2}\,\mathrm{d}x+\int_0^2\frac{x^2}{4}\,\mathrm{d}x=\frac{5}{6},$$
$$E(X^3)=\int_{-1}^0\frac{x^3}{2}\,\mathrm{d}x+\int_0^2\frac{x^3}{4}\,\mathrm{d}x=\frac{7}{8},$$

因此 $\mathrm{Cov}(X,Y)=\frac{7}{8}-\frac{1}{4}\cdot\frac{5}{6}=\frac{2}{3}$.

(3)

$$F\left(-\frac{1}{2},4\right)=P\left(X\leqslant -\frac{1}{2},Y\leqslant 4\right)=P\left(X\leqslant -\frac{1}{2},X^2\leqslant 4\right)$$
$$=P\left(X\leqslant -\frac{1}{2},-2\leqslant X\leqslant 2\right)=P\left(-2\leqslant X\leqslant -\frac{1}{2}\right)=\int_{-1}^{-\frac{1}{2}}\frac{1}{2}\,\mathrm{d}x=\frac{1}{4}.$$

23.(本题满分 13 分)

设总体 X 的概率密度为 $f(x;\theta)=\begin{cases}\theta, & 0<x<1\\ 1-\theta, & 1\leqslant x<2\\ 0, & 其他\end{cases}$,其中 θ 是未知参数 $(0<\theta<1)$, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为来自总体 X 的简单随机样本, 记 N 为样本值 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 中小于 1 的个数.

(1) 求 θ 的矩估计;

(2) 求 θ 的最大似然估计.

解 (1) 总体均值为 $\bar{X}=\int_0^1\theta x\,\mathrm{d}x+\int_1^2(1-\theta)x\,\mathrm{d}x=\frac{3}{2}-\theta$, 令样本均值 $\bar{X}=\frac{3}{2}-\theta$, 解得 $\theta=\frac{3}{2}-\bar{X}$, 即 θ 的矩估计为 $\hat{\theta}=\frac{3}{2}-\bar{X}$.

(2) 似然函数为

$$L(\theta)=\prod_{i=1}^{n}f(x_i;\theta)=\theta^N(1-\theta)^{n-N},$$

取对数得 $\ln L(\theta)=N\ln\theta+(n-N)\ln(1-\theta)$, 令

$$\frac{\mathrm{d}\ln L(\theta)}{\mathrm{d}\theta}=\frac{N}{\theta}-\frac{n-N}{1-\theta}=0,$$

解得 $\theta=\frac{N}{n}$, 因此 θ 的最大似然估计为 $\hat{\theta}=\frac{N}{n}$.

2　2007 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 10 题, 每题 4 分, 共 40 分.

1. 当 $x \to 0^+$ 时, 与 $\sqrt{x}$ 等价的无穷小量是　　　　(　)

A. $1-\mathrm{e}^{\sqrt{x}}$　　B. $\ln\dfrac{1+x}{1-\sqrt{x}}$　　C. $\sqrt{1+\sqrt{x}}-1$　　D. $1-\cos\sqrt{x}$

解　当 $x \to 0^+$ 时,

$$1-\mathrm{e}^{\sqrt{x}}=-\sqrt{x},$$
$$\ln\frac{1+x}{1-\sqrt{x}}=\ln\left(\frac{1+x}{1-\sqrt{x}}-1+1\right)\sim\frac{1+x}{1-\sqrt{x}}-1=\frac{x+\sqrt{x}}{1-\sqrt{x}}\sim\sqrt{x},$$
$$\sqrt{1+\sqrt{x}}-1\sim\frac{1}{2}\sqrt{x},$$
$$1-\cos\sqrt{x}\sim\frac{1}{2}x.$$

因此选 B.

2. 设函数 $f(x)$ 在 $x=0$ 处连续, 下列命题错误的是　　　　(　)

A. 若 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{f(x)}{x}$ 存在, 则 $f(0)=0$

B. 若 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{f(x)+f(-x)}{x}$ 存在, 则 $f(0)=0$

C. 若 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{f(x)}{x}$ 存在, 则 $f'(0)=0$

D. 若 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{f(x)-f(-x)}{x}$ 存在, 则 $f'(0)=0$

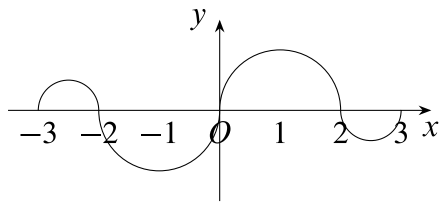
解　A, B 两项中分母的极限均为 0, 因此分子的极限也为 0, 再由 $f(x)$ 的连续性知 $f(0)=0$. 若 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{f(x)}{x}$ 存在, 则

$$f(0)=0,\ f'(0)=\lim_{x\to0}\frac{f(x)-f(0)}{x-0}=\lim_{x\to0}\frac{f(x)}{x},$$

因此 C 正确. 可举反例 $f(x)=|x|$ 说明 D 选项错误, 选 D.

3. 如图, 连续函数 $y=f(x)$ 在区间 $[-3,-2],[2,3]$ 上的图形分别是直径为 1 的上、下半圆周, 在区间 $[-2,0],[0,2]$ 的图形分别是直径为 2 的下、上半圆周, 设 $F(x)=$

$\int_0^x f(t)\,dt$. 则下列结论正确的是 ( )



第 3 题图

A. $F(3)=-\frac{3}{4}F(-2)$ B. $F(3)=\frac{5}{4}F(2)$

C. $F(-3)=\frac{3}{4}F(2)$ D. $F(-3)=-\frac{5}{4}F(-2)$

解 根据定积分的几何意义知, $F(2)$ 是半径为 1 的半圆面积, $F(2)=\frac{1}{2}\pi$, $F(3)$ 是两个半圆的面积之差, $F(3)=\frac{1}{2}\pi\left[1-\left(\frac{1}{2}\right)^2\right]=\frac{3}{8}\pi=\frac{3}{4}F(2)$,

$$F(-3)=\int_0^{-3}f(x)\,dx=-\int_{-3}^{0}f(x)\,dx=\int_0^3 f(x)\,dx=F(3),$$

因此选 C.

4. 设函数 $f(x,y)$ 连续, 则二次积分 $\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}dx\int_{\sin x}^{1}f(x,y)\,dy$ 等于 ( )

A. $\int_0^1 dy\int_{\pi+\arcsin y}^{\pi}f(x,y)\,dy$ B. $\int_0^1 dy\int_{\pi-\arcsin y}^{\pi}f(x,y)\,dy$

C. $\int_0^1 dy\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi+\arcsin y}f(x,y)\,dx$ D. $\int_0^1 dy\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi-\arcsin y}f(x,y)\,dx$

解 积分区域 $D:\frac{\pi}{2}\leqslant x\leqslant\pi, \sin x\leqslant y<1$, 也可表示为

$$0\leqslant 1, \pi-\arcsin y\leqslant x\leqslant\pi,$$

因此 $\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}dx\int_{\sin x}^{1}f(x,y)\,dy=\int_0^1 dy\int_{\pi-\arcsin y}^{\pi}f(x,y)\,dy$, 选 B.

5. 设某商品的需求函数为 $Q=160-2P$, 其中 Q, P 分别表示需求量和价格, 如果该商品需求弹性的绝对值等于 1, 则商品的价格是 ( )

A. 10 B. 20 C. 30 D. 40

解 商品需求弹性的绝对值为 $\left|\frac{dQ}{dP}\cdot\frac{P}{Q}\right|=\left|\frac{-2P}{160-2P}\right|=1\Rightarrow P=40$, 选 D.

6. 曲线 $y=\frac{1}{x}+\ln(1+e^x)$ 渐近线的条数为 ( )

A. 0 B. 1 C. 2 D. 3

解 因为 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1}{x}\ln(1+\mathrm{e}^x)=\infty$, 所以 $x=0$ 为垂直渐近线. 又 $\lim\limits_{x\to-\infty}\dfrac{1}{x}\ln(1+\mathrm{e}^x)=0$, 所以 $y=0$ 为水平渐近线. 又

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{y}{x}=\lim_{x\to+\infty}\left[\frac{1}{x^2}+\frac{\ln(1+\mathrm{e}^x)}{x}\right]=\lim_{x\to+\infty}\frac{\ln(1+\mathrm{e}^x)}{x}=\lim_{x\to+\infty}\frac{\mathrm{e}^x}{1+\mathrm{e}^x}=1.$$

$$\begin{aligned}\lim_{x\to+\infty}(y-x)&=\lim_{x\to+\infty}\left[\frac{1}{x}+\ln(1+\mathrm{e}^x)-x\right]\\&=\lim_{x\to+\infty}[\ln(1+\mathrm{e}^x)-x]=\lim_{x\to+\infty}\ln(1+\mathrm{e}^{-x})=0,\end{aligned}$$

所以有斜渐近线 $y=x$, 选 D.

7. 设向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关, 则下列向量组线性相关的是 ( )

A. $\boldsymbol{\alpha}_1-\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_3-\boldsymbol{\alpha}_1$　　B. $\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_3+\boldsymbol{\alpha}_1$

C. $\boldsymbol{\alpha}_1-2\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2-2\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_3-2\boldsymbol{\alpha}_1$　　D. $\boldsymbol{\alpha}_1+2\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2+2\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_3+2\boldsymbol{\alpha}_1$

解 不难知 A 中三个向量的和为 $\mathbf{0}$, 因此选 A. B 选项中的向量是线性无关的, 因为

$$(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_3+\boldsymbol{\alpha}_1)=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)\begin{pmatrix}1&0&1\\1&1&0\\0&1&1\end{pmatrix},$$

其中 $\begin{pmatrix}1&0&1\\1&1&0\\0&1&1\end{pmatrix}$ 不可逆, 因此 B 中的向量线性无关, 类似可得 C, D 也线性无关.

8. 设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ ( )

A. 合同, 且相似　　B. 合同, 但不相似

C. 不合同, 但相似　　D. 既不合同, 也不相似

解 由 $|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=0$ 得 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $0,3,3$, 而 $\boldsymbol{B}$ 的特征值为 $0,1,1$, 从而 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 合同而不相似, 选 B.

9. 某人向同一目标独立重复射击, 每次设计射击命中目标的概率为 $p\ (0<p<1)$, 则此人第 4 次射击恰好第 2 次命中目标的概率为 ( )

A. $3p(1-p)^2$　　B. $6p(1-p)^2$　　C. $3p^2(1-p)^2$　　D. $6p^2(1-p)^2$

解 “第 4 次射击恰好第 2 次命中” 表示第 4 次射击命中目标, 前 3 次中只有 1 次命中目标, 因此所求的概率为 $\mathrm{C}_3^1p^2(1-p)^2=3p^2(1-p)^2$, 选 C.

10. 设随机变量 (X,Y) 服从二维正态分布, 且 X 与 Y 不相关, $f_X(x)$, $f_Y(y)$ 分别表示 X,Y 的概率密度, 则在 $Y=y$ 的条件下, X 的条件概率密度 $f_{X|Y}(x|y)$ 为 ( )

A. $f_X(x)$　　B. $f_Y(y)$　　C. $f_X(x)f_Y(y)$　　D. $\dfrac{f_X(x)}{f_Y(y)}$

解 因为 (X,Y) 服从二维正态分布, 且 X 与 Y 不相关, 故 X 与 Y 相互独立, 于是 $f_{X|Y}(x|y)=f_X(x)$, 因此选 A.

二 填空题, 11 ～ 16 题, 每题 4 分, 共 24 分.

11. $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{x^3+x^2+1}{2^x+x^3}(\sin x+\cos x)=$________.

解 当 $x\to+\infty$ 时, 2^x 是比 x^3 高阶的无穷大, 而 $\sin x+\cos x$ 有界, 根据无穷小乘以有界量为无穷小知原极限为 0.

12.设函数 $y=\dfrac{1}{2x+3}$, 则 $y^{(n)}(0)=$________.

解 $y=(2x+3)^{-1}, y'=-1\cdot 2(2x+3)^{-2}, y''=-1\cdot(-2)2^2(2x+3)^{-3}$, 归纳可知 $y^{(n)}=(-1)^n n!2^n(2x+3)^{-n-1}$, 从而 $y^{(n)}(0)=\dfrac{1}{3}(-1)^n n!\left(\dfrac{2}{3}\right)^n$.

13.设 $f(u,v)$ 是二元可微函数, $z=f\left(\dfrac{y}{x},\dfrac{x}{y}\right)$, 则 $x\dfrac{\partial z}{\partial x}-y\dfrac{\partial z}{\partial y}=$________.

解 $\dfrac{\partial z}{\partial x}=f_1'\cdot\left(-\dfrac{y}{x^2}\right)+f_2'\cdot\dfrac{1}{y}, \dfrac{\partial z}{\partial y}=f_1'\cdot\dfrac{1}{x}+f_2'\cdot\left(-\dfrac{x}{y^2}\right)$, 于是有

$$x\frac{\partial z}{\partial x}-y\frac{\partial z}{\partial y}=x\left(-\frac{y}{x^2}f_1'+\frac{1}{y}f_2'\right)-y\left(\frac{1}{x}f_1'-\frac{x}{y^2}f_2'\right)=-\frac{2y}{x}f_1'+\frac{2x}{y}f_2'.$$

14.微分方程 $\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}=\dfrac{y}{x}-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{y}{x}\right)^3$ 满足 $y\big|_{x=1}=1$ 的特解为 $y=$________.

解 令 $y=xu$, 则 $\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}=u+x\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x}$, 代入原方程得

$$u+x\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x}=u-\frac{1}{2}u^3,$$

变量分离解得 $\dfrac{1}{u^2}=\dfrac{x^2}{y^2}=\ln|x|+C$, 代入 $y\big|_{x=1}=1$ 得 $C=1$. 因此 $y^2=\dfrac{x^2}{\ln|x|+1}$, 注意到 $y(1)>0$, 因此特解为 $y=\dfrac{|x|}{\sqrt{\ln|x|+1}}$.

15.设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{A}^3$ 的秩为________.

解 直接计算可得 $\boldsymbol{A}^3=\begin{pmatrix}0&0&0&1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix}$, 故 $r(\boldsymbol{A}^3)=1$.

16.在区间 $(0,1)$ 中随机地取两个数,则这两个数之差的绝对值小于 $\frac{1}{2}$ 的概率为________.

解 这是一个几何概型,设 x,y 为所取的两个数,则样本空间 $\Omega=\{(x,y)|0<x,y<1\}$,记

$$A=\left\{(x,y)\in\Omega,|x-y|<\frac{1}{2}\right\}.$$

于是所求概率为 $P(A)=\frac{S_A}{S_\Omega}=\frac{3}{4}$,其中 S_A,S_Ω 分别表示 A 与 Ω 的面积.

三 解答题, 17 ~ 24 题, 共 86 分.

17.(本题满分 10 分)

设函数 $y=y(x)$ 由方程 $y\ln y-x+y=0$ 确定,试判断曲线 $y=y(x)$ 在点 $(1,1)$ 附近的凹凸性.

解 原方程两边对 x 求导得

$$y'\ln y-1+2y'=0\Rightarrow y'=\frac{1}{2+\ln y},$$

因此 $y'(1)=\frac{1}{2}$. 上式两边再对 x 求导得

$$y''=-\frac{1}{(2+\ln y)^2}\frac{y'}{y}=-\frac{y'}{y(2+\ln y)^2}.$$

在点 $(1,1)$ 处, $y''(1)=-\frac{1}{8}<0$, 且 y'' 在 $(1,1)$ 附近连续, 因此 $y''<0$ 在此点的邻域内成立, 所以 $y=y(x)$ 在点 $(1,1)$ 附近是凸的.

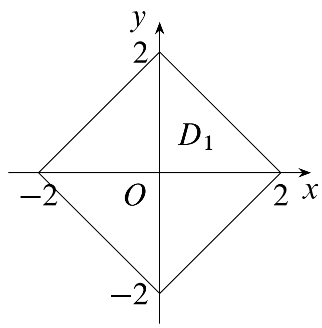
18.(本题满分 11 分)

设二元函数

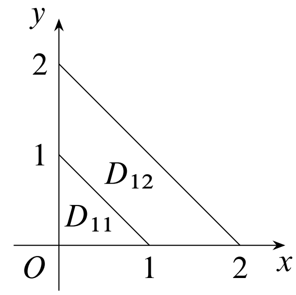
$$f(x,y)=\begin{cases}x^2, & |x|+|y|\leqslant 1\\ \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}, & 1\leqslant |x|+|y|\leqslant 2\end{cases},$$

计算二重积分 $\iint\limits_D f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma$, 其中 $D=\{(x,y)\big||x|+|y|\leqslant 2\}$.

解 区域 D 如图 (1) 所示, 它关于 x,y 轴对称, $f(x,y)$ 关于 x,y 均为偶函数, 得



(1)



(2)

$$\iint\limits_{D} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma = 4\iint\limits_{D_1} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma,$$

其中 D_1 是 D 在第一象限的部分.

由于被积函数分块表示, 将 D_1 分成如图 (2) 所示的两部分: $D_1 = D_{11}\cup D_{12}$, 其中

$$D_{11}: |x|+|y| \leqslant 1, x\geqslant 0, y\geqslant 0, \qquad D_{12}: 1\leqslant |x|+|y|\leqslant 2, x\geqslant 0, y\geqslant 0.$$

于是 $\iint\limits_{D_1} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma = \iint\limits_{D_{11}} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma + \iint\limits_{D_{12}} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma$, 其中

$$\iint\limits_{D_{11}} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma = \int_0^1 \mathrm{d}x\int_0^{1-x} x^2\,\mathrm{d}y = \int_0^1 x^2(1-x)\,\mathrm{d}x = \frac{1}{3}-\frac{1}{4} = \frac{1}{12}.$$

$$\begin{aligned}\iint\limits_{D_{12}} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma &= \iint\limits_{D_{12}} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}\,\mathrm{d}\sigma = \int_0^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{d}\theta\int_{\frac{1}{\cos\theta+\sin\theta}}^{\frac{2}{\cos\theta+\sin\theta}} \frac{1}{r}\cdot r\,\mathrm{d}r\\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\cos\theta+\sin\theta}\,\mathrm{d}\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\mathrm{d}\theta}{\sqrt{2}\sin\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)}\\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}\ln\left|\csc\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)-\cot\left(\theta+\frac{\pi}{4}\right)\right|\Bigg|_0^{\frac{\pi}{2}} = \sqrt{2}\ln\left(1+\sqrt{2}\right).\end{aligned}$$

所以

$$\iint\limits_{D} f(x,y)\,\mathrm{d}\sigma = \frac{1}{3}+4\sqrt{2}\ln\left(1+\sqrt{2}\right).$$

19.(本题满分 11 分)

设函数 $f(x), g(x)$ 在 $[a,b]$ 上连续, 在 (a,b) 内具有二阶导数存在相等的最大值, $f(a)=g(a), f(b)=g(b)$, 证明: 存在 $\xi\in(a,b)$, 使得 $f''(\xi)=g''(\xi)$.

证 令 $F(x)=f(x)-g(x)$, 由题意有 $F(a)=F(b)=0$. 又 $f(x),g(x)$ 在 (a,b) 内具有相等的最大值, 不妨设存在 $x_1\leqslant x_2, x_1,x_2\in(a,b)$ 使得

$$f(x_1)=M=\max_{x\in[a,b]},g(x_2)=M=\max_{x\in[a,b]}g(x).$$

若 $x_1=x_2$, 令 $c=x_1$, 则 $F(c)=0$. 若 $x_1<x_2$, 因 $F(x_1)=f(x_1)-g(x_1)\geqslant 0$, $F(x_2)=f(x_2)-g(x_2)\leqslant 0$, 从而存在 $c\in[x_1,x_2]\subset(a,b)$, 使得 $F(c)=0$.

在区间 $[a,c],[c,b]$ 上分别利用罗尔定理知, 存在 $\xi_1\in(a,c),\xi_2\in(c,b)$, 使得

$$F'(\xi_1)=F'(\xi_2)=0.$$

再对 $F'(x)$ 在区间 $[\xi_1,\xi_2]$ 上应用罗尔定理, 存在 $\xi\in(\xi_1,\xi_2)\subset(a,b)$, 有 $F''(\xi)=0$, 即 $f''(\xi)=g''(\xi)$.

20.(本题满分 10 分)

将函数 $f(x)=\dfrac{1}{x^2-3x-4}$ 展开成 $x-1$ 的幂级数, 并指出其收敛区间.

解 令 $t=x-1$, 则

$$\begin{aligned}\frac{1}{x^2-3x-4}&=\frac{1}{(x-4)(x+1)}=\frac{1}{(t-3)(t+2)}\\&=\frac{1}{5}\left(\frac{1}{t-3}-\frac{1}{t+2}\right)=-\frac{1}{15}\frac{1}{1-\frac{t}{3}}-\frac{1}{10}\frac{1}{1+\frac{t}{2}}\\&=-\frac{1}{15}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{t}{3}\right)^n-\frac{1}{10}\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\left(\frac{t}{2}\right)^n\\&=\sum_{n=0}^{\infty}\left[-\frac{1}{15}\left(\frac{1}{3}\right)^n-\frac{1}{10}\left(-\frac{1}{2}\right)^n\right](x-1)^n.\end{aligned}$$

其收敛区间满足 $|x-1|<3,|x-1|<2$, 即收敛区间为 $(-1,3)$.

21.(本题满分 11 分)

设线性方程组

$$\begin{cases}x_1+x_2+x_3=0\\x_1+2x_2+ax_3=0\\x_1+4x_2+a^2x_3=0\end{cases}\tag{1}$$

与方程

$$x_1+2x_2+x_3=a-1\tag{2}$$

有公共解, 求 a 的值及所有公共解.

解 因为方程 (1)、(2) 有公共解, 将 (1)、(2) 联立组成方程组

$$\begin{cases} x_1+x_2+x_3=0 \\ x_1+2x_2+ax_3=0 \\ x_1+4x_2+a^2x_3=0 \\ x_1+2x_2+x_3=a-1 \end{cases}. \tag{3}$$

此非齐次线性方程组的解即为所求的公共解. 对增广矩阵 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 进行初等行变换得

$$\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & a & 0 \\ 1 & 4 & a^2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & a-1 \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & a-1 & 0 \\ 0 & 0 & (a-2)(a-1) & 0 \\ 0 & 0 & 1-a & a-1 \end{pmatrix}.$$

于是当 $a=1$ 时, 有 $r(\boldsymbol{A})=r(\bar{\boldsymbol{A}})=2<3$, 方程组 (3) 有解, 此时

$$\bar{\boldsymbol{A}} \to \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

方程组是齐次的, 基础解系为 $(-1,0,1)^{\mathrm{T}}$, 所以 (1)、(2) 的公共解为 $k(-1,0,1)^{\mathrm{T}}, k \in \mathbb{R}$. 当 $a=2$ 时, $r(\boldsymbol{A})=r(\bar{\boldsymbol{A}})=3$, 方程组 (3) 有唯一解, 此时

$$\bar{\boldsymbol{A}} \to \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

故方程 (3) 的解为 $(0,1,-1)^{\mathrm{T}}$, 即 (1)、(2) 的公共解为 $(0,1,-1)^{\mathrm{T}}$.

22.(**本题满分 11 分**)

设 3 阶实对称矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值 $\lambda_1=1, \lambda_2=2, \lambda_3=-2$. $\boldsymbol{\alpha}_1=(1,-1,1)^{\mathrm{T}}$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的属于特征值 λ_1 的一个特征向量, 记 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}^5-4\boldsymbol{A}^3+\boldsymbol{E}$, 其中 $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵.

(1) 验证 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 是矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的特征向量, 并求 $\boldsymbol{B}$ 的全部特征值与特征向量;

(2) 求矩阵 $\boldsymbol{B}$.

解 (1) 由 $\boldsymbol{A\alpha}_1=\boldsymbol{\alpha}_1$ 得 $\boldsymbol{A}^2\boldsymbol{\alpha}_1=\boldsymbol{A\alpha}_1=\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{A}^3\boldsymbol{\alpha}_1=\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{A}^5\boldsymbol{\alpha}_1=\boldsymbol{\alpha}_1$, 故

$$\begin{aligned} \boldsymbol{B\alpha}_1 &= (\boldsymbol{A}^5-4\boldsymbol{A}^4+\boldsymbol{E})\boldsymbol{\alpha}_1 \\ &= \boldsymbol{A}^5\boldsymbol{\alpha}_1-4\boldsymbol{A}^4\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_1=\boldsymbol{\alpha}_1-4\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_1=-2\boldsymbol{\alpha}_1. \end{aligned}$$

因此 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 是矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的属于特征值 -2 的特征向量.

因为 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}^5-4\boldsymbol{A}^4+\boldsymbol{E}$, 及 $\boldsymbol{A}$ 的三个特征值 $\lambda_1=1,\lambda_2=2,\lambda_3=-2$, 得 $\boldsymbol{B}$ 的 3 个特征值为 $\mu_1=-2,\mu_2=1,\mu_3=1$.

设 $\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 为 $\boldsymbol{B}$ 的属于 $\mu_2=\mu_3=1$ 的两个线性无关的特征向量, 又 $\boldsymbol{A}$ 为对称矩阵, 则 $\boldsymbol{B}$ 也为对称矩阵, 因此 $\boldsymbol{\alpha}_1$ 与 $\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 正交, 即

$$\boldsymbol{\alpha}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}_2=0,\boldsymbol{\alpha}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}_3=0.$$

所以 $\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 可取为下列齐次线性方程组两个线性无关的解:

$$(1,-1,1)\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{pmatrix}=0.$$

其基础解系为 $(1,1,0)^{\mathrm{T}},(-1,0,1)^{\mathrm{T}}$, 故可取 $\boldsymbol{\alpha}_2=(1,1,0)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_3=(-1,0,1)^{\mathrm{T}}$, 即 $\boldsymbol{B}$ 的全部特征向量为 $k_1(1,-1,1)^{\mathrm{T}},k_2(1,1,0)^{\mathrm{T}}+k_2(-1,0,1)^{\mathrm{T}}$, 其中 $k_1\neq 0,k_2,k_3$ 不全为零.

(2) 令 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)=\begin{pmatrix}1&1&-1\\-1&1&0\\1&0&1\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}-2&&\\&1&\\&&1\end{pmatrix}$, 得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{B}=\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}-2&&\\&1&\\&&1\end{pmatrix}\boldsymbol{P}^{-1}&=\begin{pmatrix}1&1&-1\\-1&1&0\\1&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-2&&\\&1&\\&&1\end{pmatrix}\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&-1&1\\1&2&1\\-1&1&2\end{pmatrix}\\&=\begin{pmatrix}-2&1&-1\\2&1&0\\-2&0&1\end{pmatrix}\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&-1&1\\1&2&1\\-1&1&2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&1&-1\\1&0&1\\-1&1&0\end{pmatrix}.\end{aligned}$$

23.(本题满分 11 分)

设二维随机变量 (X,Y) 的概率密度为

$$f(x,y)=\begin{cases}2-x-y, & 0<x<1,0<y<1\\0, & \text{其他}\end{cases}.$$

(1) 求 $P(X>2Y)$;

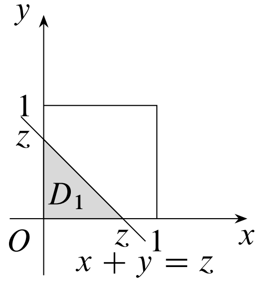
(2) 求 $Z=X+Y$ 的概率密度.

解 (1) $P(X>2Y)=\displaystyle\iint\limits_{x>2y}f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\int_0^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}y\int_{2y}^{1}(2-x-y)\,\mathrm{d}x=\frac{7}{24}$.

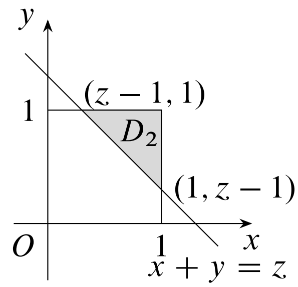
(2) 先求 Z 的分布函数:

$$F_Z(z)=P(X+Y\leqslant z)=\iint\limits_{x+y\leqslant z} f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y.$$

当 $z<0$ 时, $F_Z(z)=0$;



$0\leqslant z<1$



$1\leqslant z<2$

当 $0\leqslant z<1$ 时, $F_Z(z)=\iint\limits_{D_1} f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\int_0^z \mathrm{d}y\int_0^{z-y}(2-x-y)\,\mathrm{d}x=z^2-\frac{1}{3}z^3$;

当 $1\leqslant z<2$ 时, $F_Z(z)=1-\iint\limits_{D_2} f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=1-\int_{z-1}^1 \mathrm{d}y\int_{z-y}^1(2-x-y)\,\mathrm{d}x=$
$1-\frac{1}{3}(2-z)^3$;

当 $z\geqslant 2$ 时, $F_Z(z)=1$. 故 $Z=X+Y$ 的概率密度为

$$f_Z(z)=F_Z'(z)=\begin{cases}2z-z^2, & 0<z<1\\(2-z)^2, & 1\leqslant z<2\\0, & \text{其他}\end{cases}.$$

24.(**本题满分 11 分**)

设总体 X 的概率密度为

$$f(x;\theta)=\begin{cases}\dfrac{1}{2\theta}, & 0<x<\theta\\\dfrac{1}{2(1-\theta)}, & \theta\leqslant x<1\\0, & \text{其他}\end{cases},$$

其中参数 $\theta\ (0<\theta<1)$ 未知, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 是来自总体 X 的简单随机样本, $\overline{X}$ 是样本均值.

(1) 求参数 θ 的矩估计量 $\hat{\theta}$;

(2) 判断 $4\overline{X}^2$ 是否为 θ^2 的无偏估计量, 并说明理由.

解 (1) 总体均值

$$E(X)=\int_0^\theta \frac{x}{2\theta}\,\mathrm{d}x+\int_\theta^1 \frac{x}{2(1-\theta)}\,\mathrm{d}x=\frac{\theta}{4}+\frac{1}{4}(1+\theta)=\frac{\theta}{2}+\frac{1}{4}.$$

样本均值为 $\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$, 令 $\bar{X}=\frac{\theta}{2}+\frac{1}{3}$, 解得 $\theta=2\bar{X}-\frac{1}{2}$, 即 θ 的矩估计量为 $\hat{\theta}=2\bar{X}-\frac{1}{2}$.

(2) $E(4\bar{X}^2)=4E(\bar{X}^2)=4\left[D(\bar{X})+(E\bar{X})^2\right]=4\left[\frac{D(X)}{n}+(EX)^2\right]$, 而

$$E(X^2)=\int_0^\theta \frac{x^2}{2\theta}\,\mathrm{d}x+\int_\theta^1 \frac{x^2}{2(1-\theta)}\,\mathrm{d}x=\frac{\theta^2}{3}+\frac{1}{6}\theta+\frac{1}{6},$$

$$D(X)=E(X^2)-(EX)^2=\frac{\theta^2}{3}+\frac{1}{6}\theta+\frac{1}{6}-\left(\frac{1}{2}\theta+\frac{1}{4}\right)^2=\frac{1}{12}\theta^2-\frac{1}{12}\theta+\frac{5}{48}.$$

故 $E(4\bar{X}^2)=4\left(\frac{D(X)}{n}+(EX)^2\right)=\frac{3n+1}{3n}\theta^2+\frac{3n-1}{3n}\theta+\frac{3n+5}{12n}\neq\theta^2$, 所以 $4\bar{X}^2$ 不是 θ^2 的无偏估计量.

3　2008 年考研数学三

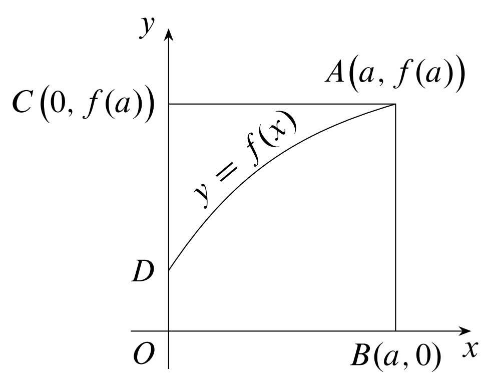
一　选择题, $1 \sim 8$ 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 设函数 $f(x)$ 在区间 $[-1,1]$ 上连续, 则 $x=0$ 是函数 $g(x)=\dfrac{\int_0^x f(t)\,\mathrm{d}t}{x}$ 的　(　)

   A. 跳跃间断点　B. 可去间断点　C. 无穷间断点　D. 震荡间断点

   解　由洛必达法则知 $\lim\limits_{x\to 0} g(x) = \lim\limits_{x\to 0} f(x) = f(0)$, 因此 $x=0$ 是 $g(x)$ 的可去间断点, 选 B.

2. 如图, 曲线段的方程为 $y=f(x)$, 函数 $f(x)$ 在区间 $[0,a]$ 上有连续的导数, 则定积分 $\displaystyle\int_0^a x f'(x)\,\mathrm{d}x$ 等于　(　)



第 2 题图

   A. 曲边梯形 $ABOD$ 的面积　B. 梯形 $ABOD$ 的面积

   C. 曲边三角形 ACD 的面积　D. 三角形 ACD 的面积

   解　由分部积分知

$$\int_0^a x f'(x)\,\mathrm{d}x = \int_0^a x\,\mathrm{d}f(x) = af(a) - \int_0^a f(x)\,\mathrm{d}x,$$

   其中 $af(a)$ 是矩形面积, $\displaystyle\int_0^a f(x)\,\mathrm{d}x$ 为曲边三角形 ACD 的面积, 选 C.

3. 已知 $f(x,y)=\mathrm{e}^{\sqrt{x^2+y^4}}$, 则　(　)

A. $f_x'(0,0)$, $f_y'(0,0)$ 都存在　　B. $f_x'(0,0)$ 不存在, $f_y'(0,0)$ 存在

C. $f_x'(0,0)$ 不存在, $f_y'(0,0)$ 存在　　D. $f_x'(0,0)$, $f_y'(0,0)$ 都不存在

解　由偏导数的定义得

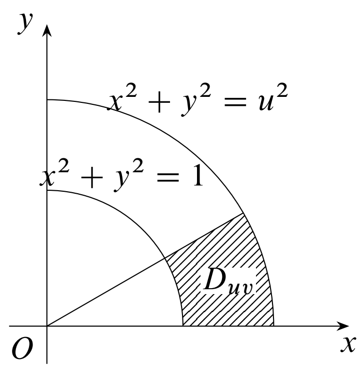
$$f_y'(0,0)=\lim_{y\to 0}\frac{\mathrm{e}^{\sqrt{0^2+y^4}}-1}{y-0}=\lim_{y\to 0}\frac{\mathrm{e}^{y^2}-1}{y-0}=0,$$

而

$$\lim_{x\to 0^+}\frac{\mathrm{e}^{\sqrt{x^2+0^4}}-1}{x-0}=\lim_{x\to 0^+}\frac{\mathrm{e}^{x}-1}{x}=1,\ \lim_{x\to 0^-}\frac{\mathrm{e}^{\sqrt{x^2+0^4}}-1}{x-0}=\lim_{x\to 0^-}\frac{\mathrm{e}^{-x}-1}{x}=-1.$$

因此 $f_x'(0,0)$ 不存在, 选 C.

4. 设函数 $f(x)$ 连续, 若 $F(u,v)=\displaystyle\iint\limits_{D_{uv}}\frac{f(x^2+y^2)}{\sqrt{x^2+y^2}}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$, 其中区域 D_{uv} 为图中阴影部分, 则 $\dfrac{\partial F}{\partial u}=$　　(　　)



第 4 题图

A. $vf(u^2)$　　B. $\dfrac{v}{u}f(u^2)$　　C. $vf(u)$　　D. $\dfrac{v}{u}f(u)$

解　利用极坐标可得

$$\begin{aligned}F(u,v)&=\iint\limits_{D_{uv}}\frac{f(x^2+y^2)}{\sqrt{x^2+y^2}}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\\&=\int_0^v\mathrm{d}v\int_1^u\frac{f(r^2)}{r}r\,\mathrm{d}r=v\int_1^u f(r^2)\,\mathrm{d}r,\end{aligned}$$

所以 $\dfrac{\partial F}{\partial u}=vf(u^2)$, 选 A.

5. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 n 阶非零矩阵, $\boldsymbol{E}$ 为 n 阶单位矩阵, 若 $\boldsymbol{A}^3=\boldsymbol{O}$, 则　　(　　)

A. $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 不可逆, $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{A}$ 不可逆　　B. $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 不可逆, $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{A}$ 可逆

C. $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 可逆, $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{A}$ 可逆　　D. $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 可逆, $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{A}$ 不可逆

解 因为 $\boldsymbol{A}^3=\boldsymbol{O}$, 所以 $\boldsymbol{A}$ 的特征值 λ 满足 $\lambda^3=0$, 即 $\lambda=0$. 因此 $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{A}$ 的所有特征值均为 1, 都可逆, 选 C.

6. 设 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&2\\2&1\end{pmatrix}$, 则在实数域上与 $\boldsymbol{A}$ 合同的矩阵为 ( )

A. $\begin{pmatrix}-2&1\\1&-2\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}2&-1\\-1&2\end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix}2&1\\1&2\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}1&-2\\-2&1\end{pmatrix}$

解 $|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}\lambda-1&-2\\-2&\lambda-1\end{vmatrix}=(\lambda-1)^2-4=(\lambda+1)(\lambda-3)=0$, 则 $\lambda_1=-1,\lambda_2=3$, 记 $\boldsymbol{D}=\begin{vmatrix}1&-2\\-2&1\end{vmatrix}$, 则

$$|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{D}|=\begin{vmatrix}\lambda-1&2\\2&\lambda-1\end{vmatrix}=(\lambda-1)^2-4=(\lambda+1)(\lambda-3)=0,$$

则 $\lambda_1=-1,\lambda_2=3$, 正负关系指数相同, 选 D.

7. 设随机变量 X,Y 独立同分布, 且 X 的分布函数为 $F(x)$, 则 $Z=\max\{X,Y\}$ 的分布函数为 ( )

A. $F^2(x)$ B. $F(x)F(y)$

C. $1-[1-F(x)]^2$ D. $[1-F(x)][1-F(y)]$

解 由分布函数的定义可得 Z 的分布函数为

$$\begin{aligned}F_Z(x)&=P(Z\leqslant x)=P\big(\max\{X,Y\}\leqslant x\big)=P(X\leqslant x,Y\leqslant x)\\&=P(X\leqslant x)P(Y\leqslant x)=F(x)F(x)=F^2(x),\end{aligned}$$

选 A.

8. 设随机变量 $X\sim N(0,1),Y\sim N(1,4)$, 且相关系数 $\rho_{XY}=1$, 则 ( )

A. $P\{Y=-2X-1\}=1$ B. $P\{Y=2X-1\}=1$

C. $P\{Y=-2X+1\}=1$ D. $P\{Y=2X+1\}=1$

解 由于 X,Y 都服从正态分布, 且 $\rho_{XY}=1$, 所以一定存在常数 a,b 使得 $P(Y=aX+b)=1$, 且 $a>0$. 那么有 $E(Y)=aE(X)+b$, 即 $1=0+b,b=1$. 再由 $4=D(Y)=a^2D(X)=a^2$ 可知 $a=2$, 选 D.

二 填空题, 9 ∼ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设函数 $f(x)=\begin{cases}x^2+1, & |x|\leqslant c\\ \dfrac{2}{|x|}, & |x|>c\end{cases}$ 在 $(-\infty,+\infty)$ 内连续, 则 $c=$________.

解 由条件知 $\lim\limits_{x\to c^+} f(x) = \lim\limits_{x\to c^-} f(x) \Rightarrow c^2+1=\dfrac{2}{c}, c=1.$

10.设 $f\left(x+\dfrac{1}{x}\right)=\dfrac{x+x^3}{1+x^4}$, 则 $\displaystyle\int_2^{2\sqrt{2}} f(x)\,\mathrm{d}x =$________.

解 由题意知 $f\left(x+\dfrac{1}{x}\right)=\dfrac{\frac{1}{x}+x}{\frac{1}{x^2}+x^2}=\dfrac{\frac{1}{x}+x}{\left(\frac{1}{x}+x\right)^2-2}$, 所以 $f(t)=\dfrac{t}{t^2-2}$, 于是

$$\int_2^{2\sqrt{2}} f(x)\,\mathrm{d}x=\int_2^{2\sqrt{2}}\frac{x}{x^2-2}\,\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\ln(x^2-2)\Big|_2^{2\sqrt{2}}=\frac{1}{2}\ln 3.$$

11.设 $D=\{(x,y)|x^2+y^2\leqslant 1\}$, 则 $\displaystyle\iint_D (x^2-y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y =$________.

解 $\displaystyle\iint_D (x^2-y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\iint_D x^2\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\frac{1}{2}\iint_D (x^2+y^2)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\frac{1}{2}\int_0^1 2\pi r\,\mathrm{d}r=\frac{\pi}{2}.$

12.微分方程 $xy'+y=0$ 满足条件 $y(1)=1$ 的解是 $y=$________.

解 由 $xy'+y=(xy)'=0$ 知 $xy=C$, 代入 $y(1)=1$ 知 $C=1$, 所以方程的解为 $y=\dfrac{1}{x}$.

13.设 3 阶矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $1,2,2$, $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵, 则 $|4\boldsymbol{A}^{-1}-\boldsymbol{E}|=$________.

解 $\boldsymbol{A}^{-1}$ 的特征值为 $1,\dfrac{1}{2},\dfrac{1}{2}$, $4\boldsymbol{A}^{-1}-\boldsymbol{E}$ 的特征值为 $3,1,1$, 因此 $|4\boldsymbol{A}^{-1}-\boldsymbol{E}|=3$.

14.设随机变量 X 服从参数为 1 的泊松分布, 则 $P\{X=EX^2\}=$________.

解 因为 $X\sim P(1)$, 所以 $EX=DX=1$, 于是 $EX^2=(EX)^2+DX=2$, $P(X=EX^2)=P(X=2)=\dfrac{1}{2\,\mathrm{e}}$.

15.(本题满分 9 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1}{x^2}\ln\dfrac{\sin x}{x}$.

解

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{1}{x^2}\ln\frac{\sin x}{x}&=\lim_{x\to 0}\frac{1}{x^2}\ln\left(\frac{\sin x-x}{x}+1\right)=\lim_{x\to 0}\frac{1}{x^2}\frac{\sin x-x}{x}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{\sin x-x}{x^3}=\lim_{x\to 0}\frac{-\frac{1}{6}x^3}{x^3}=-\frac{1}{6}.\end{aligned}$$

16.(本题满分 10 分)

设 $z=z(x,y)$ 是由方程 $x^2+y^2-z=\varphi(x+y+z)$ 所确定的函数, 其中 φ 具有 2 阶导数且 $\varphi'\neq -1$.

(1) 求 $\mathrm{d}z$;

(2) 记 $u(x,y)=\dfrac{1}{x-y}\left(\dfrac{\partial z}{\partial x}-\dfrac{\partial z}{\partial y}\right)$, 求 $\dfrac{\partial u}{\partial x}$.

解 (1) 在方程 $x^2+y^2-z=\varphi(x+y+z)$ 两边求全微分得

$$2x\,\mathrm{d}x+2y\,\mathrm{d}y-\mathrm{d}z=\varphi'(x+y+z)\cdot(\mathrm{d}x+\mathrm{d}y+\mathrm{d}z),$$

解得 $dz = \dfrac{-\varphi' + 2x}{\varphi' + 1} dx + \dfrac{-\varphi' + 2y}{\varphi' + 1} dy$.

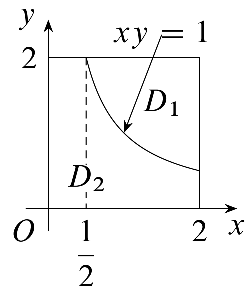
(2) $u(x, y) = \dfrac{1}{x-y}\left(\dfrac{\partial z}{\partial x} - \dfrac{\partial z}{\partial y}\right) = \dfrac{1}{x-y}\left(\dfrac{-\varphi' + 2x}{\varphi' + 1} - \dfrac{-\varphi' + 2y}{\varphi' + 1}\right) = \dfrac{2}{\varphi' + 1}$, 于是

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{-2\varphi'' \cdot \left(1 + \frac{\partial z}{\partial x}\right)}{(\varphi' + 1)^2} = -\frac{2\varphi'' \cdot \left(1 + \frac{2x - \varphi'}{1+\varphi'}\right)}{(\varphi' + 1)^2} = -\frac{2\varphi'' \cdot (1 + \varphi' + 2x - \varphi')}{(\varphi' + 1)^3}.$$

17.(本题满分 11 分)

计算 $\displaystyle\iint_D \max\{xy, 1\}\, dx\, dy$, 其中 $D = \{(x, y) | 0 \leqslant x \leqslant 2, 0 \leqslant y \leqslant 2\}$.

解 曲线 $xy = 1$ 将区域 D 分成如图所示的两个区域 D_1 和 D_2, 于是



第 18 题图

$$\begin{aligned}\iint_D \max\{xy, 1\}\, dx\, dy &= \iint_{D_1} \max\{xy, 1\}\, dx\, dy + \iint_{D_2} \max\{xy, 1\}\, dx\, dy \\ &= \int_{\frac{1}{2}}^{2} dx \int_{\frac{1}{x}}^{2} xy\, dy + \int_0^{\frac{1}{2}} dx \int_0^2 dy + \int_{\frac{1}{2}}^{2} dx \int_0^{\frac{1}{x}} dy \\ &= \frac{15}{4} - \ln 2 + 1 + 2\ln 2 = \frac{19}{4} + \ln 2.\end{aligned}$$

18.(本题满分 10 分)

设 $f(x)$ 是连续函数,

(1) 利用定义证明函数 $F(x) = \displaystyle\int_0^x f(t)dt$ 可导, 且 $F'(x) = f(x)$;

(2) 当 $f(x)$ 是以 2 为周期的周期函数时, 证明函数 $G(x) = 2\displaystyle\int_0^x f(t)dt - x\int_0^2 f(t)dt$ 也是以 2 为周期的周期函数.

证 (1) 对任意的 x, 由于函数 $f(x)$ 连续, 所以

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\int_0^{x+\Delta x} f(t)\, dt - \int_0^x f(t)\, dt}{\Delta x}$$

$$= \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} f(t)\,\mathrm{d}t}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(\xi)\,\Delta x}{\Delta x} \quad \text{(积分中值定理)}$$
$$= \lim_{\xi \to x} f(\xi) = f(x).$$

因此 $F(x)$ 可导, 且 $F'(x) = f(x)$.

(2) 令 $g(x) = G(x+2) - G(x) = 2\int_0^{x+2} f(t)\,\mathrm{d}t - 2\int_0^2 f(t)\,\mathrm{d}t - 2\int_0^x f(t)\,\mathrm{d}t$, 则

$$g'(x) = 2f(x+2) - 2f(x) = 2f(x) - 2f(x) = 0,$$

因此 $g(x)$ 为常函数, $g(x) = g(0) = 2\int_0^2 f(t)\,\mathrm{d}t - 2\int_0^2 f(t)\,\mathrm{d}t = 0$, 即 $G(x+2) = G(x)$, 这说明 $G(x)$ 是以 2 为周期的周期函数.

19.(本题满分 10 分)

设银行存款的年利率为 $r = 0.05$, 并依年复利计算, 某基金会希望通过存款 A 万元, 实现第一年提取 19 万元, 第二年提取 28 万元, $\cdots$, 第 n 年提取 $(10+9n)$ 万元, 并能按此规律一直提取下去, 问 A 至少应为多少万元?

解 设 A_n 为第 n 年的提现值, 则 $A_n = \dfrac{10+9n}{(1+r)^n}$, 故 A 至少应为

$$\begin{aligned} A &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{10+9n}{(1+r)^n} \\ &= 10\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(1+r)^n} + 9\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(1+r)^n} = 200 + 9\sum_{n=1}^{\infty} n\left(\frac{1}{1+r}\right)^n. \end{aligned}$$

注意到 $S(x) = \sum_{n=1}^{\infty} nx^n = x\left(\sum_{n=1}^{\infty} x^n\right)' = x\dfrac{x}{1-x} = \dfrac{x}{(1-x)^2}, x \in (-1,1)$, 所以 $S\left(\dfrac{1}{1+r}\right) = S\left(\dfrac{1}{1.05}\right) = 420$, 故至少应存入 $200 + 9 \times 420 = 3980$ 万元存款.

20.(本题满分 12 分)

设 n 元线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}$, 其中

$$A = \begin{pmatrix} 2a & 1 & & & & \\ a^2 & 2a & 1 & & & \\ & a^2 & 2a & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & a^2 & 2a & 1 \\ & & & & a^2 & 2a \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

(1) 证明行列式 $|\boldsymbol{A}| = (n+1)a^n$;

(2) 当 a 为何值时, 该方程组有唯一解, 并求 x_1;

(3) 当 a 为何值时, 该方程组有无穷多解, 并求其通解.

解 (1) 从第 2 行开始, 第 k 行减去上一行的 $\dfrac{k}{k+1}$ 倍, $k=2,3,\cdots,n$, 可得

$$|\boldsymbol{A}| = \begin{vmatrix} 2a & 1 & & & & \\ & \frac{3}{2}a & 1 & & & \\ & & \frac{4}{3}a & 1 & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & \frac{n}{n-1}a & 1 \\ & & & & & \frac{n+1}{n}a \end{vmatrix}$$
$$= 2a\cdot\frac{3}{2}a\cdot\frac{4}{3}a\cdots\frac{n}{n-1}a\cdot\frac{n+1}{n}a=(n+1)\,a^n.$$

(2) 由克拉默法则知当 $a\neq 0$ 时, $|\boldsymbol{A}|\neq 0$, 此时方程组有唯一解, 且 $x_1=\dfrac{D_{n-1}}{D_n}=\dfrac{n}{(n+1)a}$.

(3) 当 $a=0$ 时, 容易得到 $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{b})=n-1$, 方程组有无穷多解, 此时的通解为 $\boldsymbol{x}=(0,1,0\cdots,0)^{\mathrm{T}}+k(1,0,\cdots,0)^{\mathrm{T}}, k\in\mathbb{R}$.

21.(本题满分 10 分)

设 $\boldsymbol{A}$ 为 3 阶矩阵, $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的分别属于特征值 $-1,1$ 的特征向量, 向量 $\boldsymbol{\alpha}_3$ 满足 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3$.

(1) 证明 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关;

(2) 令 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$, 求 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}$.

解 (1) 设存在数 k_1,k_2,k_3 使得

$$k_1\boldsymbol{\alpha}_1+k_2\boldsymbol{\alpha}_2+k_3\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{0}, \tag{1}$$

用 $\boldsymbol{A}$ 左乘 (1) 两边, 并由 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_1=-\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_2=\boldsymbol{\alpha}_2$ 得

$$-k_1\boldsymbol{\alpha}_1+(k_2+k_3)\boldsymbol{\alpha}_2+k_3\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{0}, \tag{2}$$

(1) − (2), 得

$$2k_1\boldsymbol{\alpha}_1-k_3\boldsymbol{\alpha}_2=\boldsymbol{0}. \tag{3}$$

因为 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的属于不同特征值的特征向量, 所以 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2$ 线性无关, 从而 $k_1=k_3=0$. 代入 (1) 得 $k_2\boldsymbol{\alpha}_2=\boldsymbol{0}$, 由于 $\boldsymbol{\alpha}_2\neq\boldsymbol{0}$, 所以 $k_2=0$, 故 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关.

(2) 由题设, 可得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{AP} &= \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3) = (\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_3)\\ &= (\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix} = \boldsymbol{P}\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix}.\end{aligned}$$

由 (1) 知 $\boldsymbol{P}$ 为可逆矩阵, 从而 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{AP} = \begin{pmatrix}-1&0&0\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix}$.

22.(**本题满分 11 分**)

设随机变量 X 与 Y 相互独立, X 的概率分布为 $P(X=i)=\dfrac{1}{3}\ (i=-1,0,1)$, Y 的概率密度为 $f_Y(y)=\begin{cases}1, & 0\leqslant y\leqslant 1\\ 0, & 其他\end{cases}$, 记 $Z=X+Y$.

(1) 求 $P\left(Z\leqslant\dfrac{1}{2}\,\middle|\,X=0\right)$;

(2) 求 Z 的概率密度.

解 (1)

$$\begin{aligned}P\left(Z\leqslant\frac{1}{2}\,\middle|\,X=0\right) &= P\left(X+Y\leqslant\frac{1}{2}\,\middle|\,X=0\right)\\ &= P\left(Y\leqslant\frac{1}{2}\,\middle|\,X=0\right) = P\left(Y=\frac{1}{2}\right)=\frac{1}{2}.\end{aligned}$$

(2) Z 的分布函数为

$$\begin{aligned}F_Z(z) &= P(Z\leqslant z) = P(X+Y\leqslant z)\\ &= P(X+Y\leqslant z, X=-1) + P(X+Y\leqslant z, X=0) + P(X+Y\leqslant z, X=1)\\ &= P(Y\leqslant z+1, X=-1) + P(Y\leqslant z, X=0) + P(Y\leqslant z-1, X=1)\\ &= P(Y\leqslant z+1)P(X=-1) + P(Y\leqslant z)P(X=0) + P(Y\leqslant z-1)P(X=1)\\ &= \frac{1}{3}[P(Y\leqslant z-1) + P(y\leqslant z) + P(Y\leqslant z-1)]\\ &= \frac{1}{3}[F_Y(z+1) + F_Y(z) + F_Y(z-1)],\end{aligned}$$

于是 Z 的概率密度为 $f_Z(z) = F_Z'(z) = \dfrac{1}{3}[f_Y(z+1)+f_Y(z)+f_Y(z-1)] = \begin{cases}\dfrac{1}{3}, & -1\leqslant z\leqslant 2\\ 0, & 其他\end{cases}$.

23.(本题满分 11 分)

设 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是总体为 $N(\mu, \sigma^2)$ 的简单随机样本, 记

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2, T = \bar{X}^2 - \frac{1}{n}S^2.$$

(1) 证明 T 是 μ^2 的无偏估计量;

(2) 当 $\mu = 0, \sigma = 1$ 时, 求 DT.

解 (1) 因为

$$\begin{aligned} E(T) &= E\left(\bar{X}^2 - \frac{1}{n}S^2\right) = E\left(\bar{X}^2\right) - \frac{1}{n}E\left(S^2\right) \\ &= \left(E\bar{X}\right)^2 + D\left(\bar{X}\right) - \frac{1}{n}E\left(S^2\right) = \mu^2 + \frac{\sigma^2}{n} - \frac{\sigma^2}{n} = \mu^2, \end{aligned}$$

所以 T 是 μ^2 的无偏估计量.

(2) 当 $\mu = 0, \sigma = 1$ 时, 由于 $\bar{X}$ 与 S^2 独立, 则有

$$\begin{aligned} DT &= D\left(\bar{X}^2 - \frac{1}{n}S^2\right) = D\left(\bar{X}^2\right) + \frac{1}{n^2}D\left(S^2\right) \\ &= \frac{1}{n^2}D\left(\sqrt{n}\bar{X}\right)^2 + \frac{1}{n^2}\cdot\frac{1}{(n-1)^2}D\left[(n-1)S^2\right] \\ &= \frac{1}{n^2}\cdot 2 + \frac{1}{n^2}\cdot\frac{1}{(n-1)^2}\cdot 2(n-1) = \frac{2}{n^2}\left(1 + \frac{1}{n-1}\right) = \frac{2}{n(n-1)}. \end{aligned}$$

4　2009 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 函数 $f(x) = \dfrac{x - x^3}{\sin \pi x}$ 的可去间断点的个数为　　　(　　)

A. 1　　B. 2　　C. 3　　D. 无穷多个

解　显然 $f(x)$ 的间断点为所有整数, 且 $x = 0, x = \pm 1$ 为可去间断点, 其他为无穷间断点, 选 C.

2. 当 $x \to 0$ 时, $f(x) = x - \sin ax$ 与 $g(x) = x^2 \ln(1 - bx)$ 是等价无穷小, 则　　　(　　)

A. $a = 1, b = -\dfrac{1}{6}$　　B. $a = 1, b = \dfrac{1}{6}$　　C. $a = -1, b = -\dfrac{1}{6}$　　D. $a = -1, b = \dfrac{1}{6}$

解　首先当 $x \to 0$ 时, $g(x) = x^2 \ln(1 - bx) \sim -bx^3$, 利用泰勒公式得

$$f\,(x) = x - \sin ax = x - \left(ax - \frac{a^3}{6}x^3 + o\left(x^3\right)\right) = (1 - a)\,x + \frac{a^3}{6}x^3 + o\left(x^3\right),$$

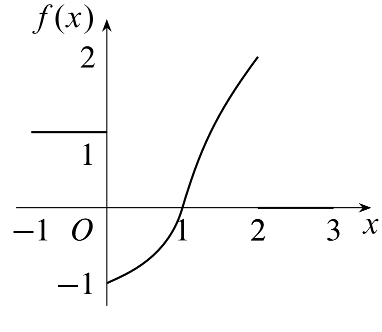
由 $f(x)$ 与 $g(x)$ 是等价无穷小知 $1 - a = 0, \dfrac{a^3}{6} = -b$, 因此 $a = 1, b = -\dfrac{1}{6}$, 选 A.

3. 使不等式 $\displaystyle\int_1^x \frac{\sin t}{t}\mathrm{d}t > \ln x$ 成立的 x 的范围是　　　(　　)

A. $(0, 1)$　　B. $\left(1, \dfrac{\pi}{2}\right)$　　C. $\left(\dfrac{\pi}{2}, \pi\right)$　　D. $(\pi, +\infty)$

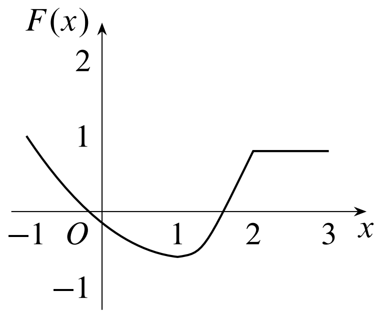
解　令 $f(x) = \displaystyle\int_1^x \frac{\sin t}{t}\mathrm{d}t - \ln x$, 则当 $x > 0$ 时, $f'(x) = \dfrac{\sin x - 1}{x} \leqslant 0$, 因此 $f(x)$ 单调递减, 且 $f(1) = 0$, 因此当 $0 < x < 1$ 时 $f(x) > 0$, 当 $x > 1$ 时 $f(x) < 0$, 选 A.

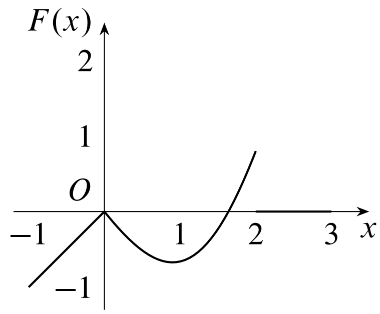
4. 设函数 $y = f(x)$ 在区间 $[-1, 3]$ 上的图形如图所示,

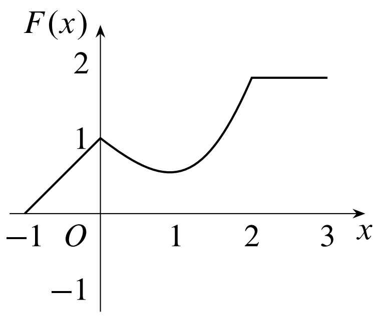


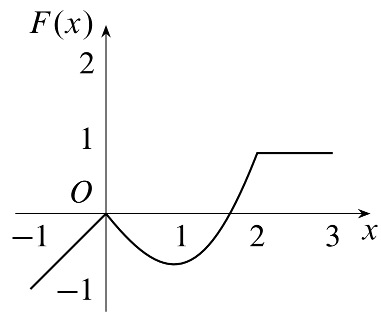
第 4 题图

则函数 $F(x)=\int_0^x f(t)\,\mathrm{d}t$ 的图形为 ( )

A. 

B. 

C. 

D. 

解 首先 $F(x)$ 是连续函数, 排除 B 选项. 当 $-1<x<0$ 时, $F'(x)=f(x)=1$ 且此时 $F(x)<0$, 排除 A, C 选项, 选 D.

5. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 均为 2 阶矩阵, $\boldsymbol{A}^*,\boldsymbol{B}^*$ 分别为 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 的伴随矩阵, 若 $|\boldsymbol{A}|=2,|\boldsymbol{B}|=3$, 则分块矩阵 $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$ 的伴随矩阵为 ( )

A. $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&3\boldsymbol{B}^*\\2\boldsymbol{A}^*&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&2\boldsymbol{B}^*\\3\boldsymbol{A}^*&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&3\boldsymbol{A}^*\\2\boldsymbol{B}^*&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&2\boldsymbol{A}^*\\3\boldsymbol{B}^*&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$

解 由 $\begin{vmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{vmatrix}=(-1)^{2\times2}|\boldsymbol{A}||\boldsymbol{B}|=6$ 知矩阵 $\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}$ 可逆, 则

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}^*&=\begin{vmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{vmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{A}\\\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}^{-1}=6\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&\boldsymbol{B}^{-1}\\\boldsymbol{A}^{-1}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}\\&=\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&6\boldsymbol{B}^{-1}\\6\boldsymbol{A}^{-1}&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{O}&2\boldsymbol{B}^*\\3\boldsymbol{A}^*&\boldsymbol{O}\end{pmatrix}.\end{aligned}$$

6. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{P}$ 均为 3 阶矩阵, $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&2&0\\0&0&2\end{pmatrix}$. 若 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3),\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$, 则 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}$ 为 ( )

A. $\begin{pmatrix}2&1&0\\1&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}1&1&0\\1&2&0\\0&0&2\end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix}2&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}1&0&0\\0&2&0\\0&0&2\end{pmatrix}$

解 由题意可知把 $\boldsymbol{P}$ 的第二列加到第一列上得到 $\boldsymbol{Q}$, 因此有 $\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\boldsymbol{Q}$. 记 $\boldsymbol{E}_{21}(1)=\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$, 于是

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}&=[\boldsymbol{P}\boldsymbol{E}_{21}(1)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}[\boldsymbol{P}\boldsymbol{E}_{21}(1)]=\boldsymbol{E}_{21}^{\mathrm{T}}(1)\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E}_{21}(1)\\&=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&1&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix},\end{aligned}$$

因此选 A.

7. 设事件 A 与事件 B 互不相容, 则 ( )

A. $P(\bar{A}\bar{B})=0$ B. $P(AB)=P(A)P(B)$

C. $P(A)=1-P(B)$ D. $P(\bar{A}\cup\bar{B})=1$

解 因为 A 与事件 B 互不相容, 即 $A\cap B=\emptyset$, 于是 $P(\bar{A}\cup\bar{B})=1-P(A\cap B)=1$, 选 D, 其他选项容易判断都不对.

8. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且 X 服从标准正态分布 $N(0,1)$, Y 的概率分布为 $P(Y=0)=P(Y=1)=\dfrac{1}{2}$. 记 $F_Z(z)$ 为随机变量 $Z=XY$ 的分布函数, 则函数 $F_Z(z)$ 的间断点个数为 ( )

A. 0 B. 1 C. 2 D. 3

解 Z 的分布函数为

$$\begin{aligned}F_Z(z)&=P(Z\leqslant z)=P(XY\leqslant z)\\&=P(Y=0)P(XY\leqslant z|Y=0)+P(Y=1)P(XY\leqslant z|Y=1)\\&=\frac{1}{2}P(0\leqslant z|Y=0)+\frac{1}{2}P(X\leqslant z|Y=1)\\&=\frac{1}{2}P(0\leqslant z)+\frac{1}{2}P(X\leqslant z)=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\Phi(z), & z<0\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\Phi(z), & z\geqslant 0\end{cases}\end{aligned}$$

因此 $F_Z(z)$ 在 $z=0$ 处有一个跳跃间断点, 选 B.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\mathrm{e}-\mathrm{e}^{\cos x}}{\sqrt[3]{1+x^2}-1}=$________.

解 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\mathrm{e}-\mathrm{e}^{\cos x}}{\sqrt[3]{1+x^2}-1}=\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\mathrm{e}\left(1-\mathrm{e}^{\cos x-1}\right)}{\frac{1}{3}x^2}=3\mathrm{e}\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1-\cos x}{x^2}=\dfrac{3\mathrm{e}}{2}$.

10.设 $z=(x+\mathrm{e}^y)^x$, 则 $\left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_{(1,0)}=$________.

解 因为 $\dfrac{\partial z}{\partial x}=(x+\mathrm{e}^y)^x\left[\ln(x+\mathrm{e}^y)+\dfrac{x}{x+\mathrm{e}^y}\right]$, 所以 $\left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_{(1,0)}=2\ln 2+1$.

11.幂级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{\mathrm{e}^n-(-1)^n}{n^2}x^n$ 的收敛半径为________.

解 记 $a_n=\dfrac{\mathrm{e}^n-(-1)^n}{n^2}$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty}\left|\dfrac{a_{n+1}}{a_n}\right|=\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{n^2\left[\mathrm{e}^{n+1}-(-1)^{n+1}\right]}{(n+1)^2\left[\mathrm{e}^n-(-1)^n\right]}=\mathrm{e}$, 因此幂级数的收敛半径为 $\dfrac{1}{\mathrm{e}}$.

12.设某产品的需求函数 $Q=Q(p)$, 对其价格 p 的弹性 $\varepsilon_p=0.2$, 则当需求量为 10000 件时, 价格增加 1 元会使产品收益增加________元.

解 收益函数 $R=pQ$, 则 $\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}p}=Q+p\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}p}$. 由题意有 $\varepsilon_p=-\dfrac{p}{Q}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}p}=0.2$, 因此 $p\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}p}=-0.2Q$, 于是 $\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}p}=-0.2Q+Q=0.8Q$. 代入 $Q=10000$. 可知当价格增加 1 元会使产品收益增加 8000 元.

13.设 $\boldsymbol{\alpha}=(1,1,1)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\beta}=(1,0,k)^{\mathrm{T}}$. 若矩阵 $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}$ 相似于 $\begin{pmatrix}3&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}$, 则 $k=$________.

解 相似矩阵有相同的迹, 则 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}})=3=\mathrm{tr}(\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha})=\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}=1+k$, 因此 $k=2$.

提示: 当矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 可以互乘时, $\mathrm{tr}(\boldsymbol{AB})=\mathrm{tr}(\boldsymbol{BA})$, 矩阵 $\boldsymbol{AB}$ 与 $\boldsymbol{BA}$ 的所有非零特征值及其重数都相同.

14.设 $X_1,X_2,\cdots,X_m$ 为来自总体 $B(n,p)$ 的简单随机样本, $\bar{X}$ 和 S^2 分别为样本均值和样本方差. 记统计量 $T=\bar{X}-S^2$, 则 $ET=$________.

解 $ET=E\left(\bar{X}-S^2\right)=E\bar{X}-E\left(S^2\right)=np-np(1-p)=np^2$.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 9 分)

求二元函数 $f(x,y)=x^2(2+y^2)+y\ln y$ 的极值.

解 令 $\begin{cases} f_x'(x,y)=2x(2+y^2)=0 \\ f_y'(x,y)=2x^2y+\ln y+1=0 \end{cases}$, 解得唯一驻点为 $\left(0,\dfrac{1}{\mathrm{e}}\right)$. 由于

$$A=f_{xx}''\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)=2(2+y^2)\Big|_{\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)}=2\left(2+\frac{1}{\mathrm{e}^2}\right),$$

$$B=f_{xy}''\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)=4xy\Big|_{\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)}=0,$$

$$C=f_{yy}''\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)=\left(2x^2+\frac{1}{y}\right)\Big|_{\left(0,\frac{1}{\mathrm{e}}\right)}=\mathrm{e},$$

所以 $AC-B^2=-2\mathrm{e}\left(2+\dfrac{1}{\mathrm{e}^2}\right)<0$, 且 $A>0$, 所以 $f(x,y)$ 的唯一极小值为 $f\left(0,\dfrac{1}{\mathrm{e}}\right)=-\dfrac{1}{\mathrm{e}}$.

16.(**本题满分 10 分**)

计算不定积分 $\displaystyle\int \ln\left(1+\sqrt{\frac{1+x}{x}}\right)\mathrm{d}x\ (x>0)$.

解 令 $t=\sqrt{\dfrac{1+x}{x}}>1$, 则 $x=\dfrac{1}{t^2-1}$, 于是

$$\begin{aligned}\int \ln\left(1+\sqrt{\frac{1+x}{x}}\right)\mathrm{d}x &= \int \ln(1+t)\,\mathrm{d}\left(\frac{1}{t^2-1}\right)\\
&=\frac{\ln(1+t)}{t^2-1}-\int\frac{1}{(t^2-1)(t+1)}\mathrm{d}t\\
&=\frac{\ln(1+t)}{t^2-1}-\frac{1}{4}\int\left(\frac{1}{t-1}-\frac{1}{t+1}-\frac{2}{(t+1)^2}\right)\mathrm{d}t\\
&=\frac{\ln(1+t)}{t^2-1}-\frac{1}{4}\ln\frac{t-1}{t+1}+\frac{1}{2(t+1)}+C\\
&=x\ln\left(1+\sqrt{\frac{1+x}{x}}\right)+\frac{1}{2}\ln\left(\sqrt{1+x}+\sqrt{x}\right)\\
&\quad-\frac{\sqrt{x}}{2\left(\sqrt{1+x}+\sqrt{x}\right)}+C.\end{aligned}$$

17.(**本题满分 10 分**)

计算二重积分 $\displaystyle\iint_D (x-y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, 其中 $D=\{(x,y)|(x-1)^2+(y-1)^2\leqslant 2, y\geqslant x\}$.

解 方法一 积分区域可表示为 $D=\left\{(r,\theta)\,\middle|\,\dfrac{\pi}{4}\leqslant\theta\leqslant\dfrac{3\pi}{4}, 0\leqslant r\leqslant 2(\cos\theta+\sin\theta)\right\}$, 故

$$\iint_D (x-y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}}\mathrm{d}\theta\int_0^{2(\sin\theta+\cos\theta)} r^2(\cos\theta-\sin\theta)\,\mathrm{d}r$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{8}{3}\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} (\sin\theta+\cos\theta)^3 \,\mathrm{d}(\sin\theta+\cos\theta) \\
&= \frac{2}{3}(\sin\theta+\cos\theta)^4\Big|_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} = -\frac{8}{3}.
\end{aligned}
$$

方法二 作换元 $u=x-1, v=y-1$, 则 $\mathrm{d}x=\mathrm{d}u, \mathrm{d}y=\mathrm{d}v$, 积分区域化为 $D_1=\{(u,v)|u^2+v^2\leqslant 2, v\geqslant u\}$, 于是

$$\iint\limits_{D}(x-y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\iint\limits_{D_1}(u-v)\mathrm{d}u\mathrm{d}v=\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}}\mathrm{d}\theta\int_0^{\sqrt{2}}(r\cos\theta-r\sin\theta)\,r\mathrm{d}r=-\frac{8}{3}.$$

18.(本题满分 11 分)

(1) 证明拉格朗日中值定理: 若函数 $f(x)$ 在 $[a,b]$ 上连续, 在 (a,b) 内可导, 则存在 $\xi\in(a,b)$, 使得 $f(b)-f(a)=f'(\xi)(b-a)$.

(2) 证明: 若函数 $f(x)$ 在 $x=0$ 处连续, 在 $(0,\delta)(\delta>0)$ 内可导, 且 $\lim\limits_{x\to 0^+}f'(x)=A$, 则 $f'_+(0)$ 存在, 且 $f'_+(0)=A$.

证 (1) 令 $F(x)=f(x)-\dfrac{f(b)-f(a)}{b-a}x$, 则

$$
\begin{aligned}
F(b)-F(a)&=\left(f(b)-\frac{f(b)-f(a)}{b-a}b\right)-\left(f(a)-\frac{f(b)-f(a)}{b-a}a\right)\\
&=f(b)-f(a)-\frac{f(b)-f(a)}{b-a}(b-a)=0,
\end{aligned}
$$

因此由罗尔定理知存在 $\xi\in(a,b)$ 使得 $F'(\xi)=f'(\xi)-\dfrac{f(b)-f(a)}{b-a}=0$, 即 $f(b)-f(a)=f'(\xi)(b-a)$.

(2) 利用导数的定义与拉格朗日中值定理得

$$f'_+(0)=\lim_{x\to 0^+}\frac{f(x)-f(0)}{x}=\lim_{x\to 0^+}\frac{xf'(\xi)}{x}=\lim_{\xi\to 0}f'(\xi)=A.$$

提示: 本题第二问的结论叫做导函数极限定理, 它还可以用洛必达法则得出.

19.(本题满分 10 分)

设曲线 $y=f(x)$, 其中 $f(x)$ 是可导函数, 且 $f(x)>0$. 已知曲线 $y=f(x)$ 与直线 $y=0, x=1$ 及 $x=t(t>1)$ 所围成的曲边梯形绕 x 轴旋转一周所得的立体体积值是该曲边梯形面积值的 πt 倍, 求该曲线的方程.

解 旋转体的体积为 $V=\pi\int_1^t f^2(x)\mathrm{d}x$, 曲边梯形的面积为 $S=\int_1^t f(x)\mathrm{d}x$, 由题意可知

$$V=\pi t S\Rightarrow \pi\int_1^t f^2(x)\mathrm{d}x=\pi t\int_1^t f(x)\mathrm{d}x\Rightarrow\int_1^t f^2(x)\mathrm{d}x=t\int_1^t f(x)\mathrm{d}x.$$

上式两边对 t 求导得 $f^2(t)=\int_1^t f(x)\mathrm{d}x+tf(t)$, 令 $t=1$ 可得 $f(1)=1$. 继续对 t 求导得 $2f(t)f'(t)=f(t)+f(t)+tf'(t)$, 化简可得 $(2f(t)-t)f'(t)=2f(t)$, 这是 t 关于 y 的一阶线性方程 $\dfrac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}y}+\dfrac{1}{2y}t=1$, 解得 $t=\dfrac{C}{\sqrt{y}}+\dfrac{2}{3}y$. 由 $f(1)=1$ 可知 $C=\dfrac{1}{3}$, 因此 $t=\dfrac{1}{3\sqrt{y}}+\dfrac{2}{3}y$, 该曲线的方程为 $2y+\dfrac{1}{\sqrt{y}}-3x=0$.

20.(**本题满分 11 分**)

设 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&-1&-1\\-1&1&1\\0&-4&-2\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{\xi}_1=\begin{pmatrix}-1\\1\\-2\end{pmatrix}$.

(1) 求满足 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}_2=\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{A}^2\boldsymbol{\xi}_3=\boldsymbol{\xi}_1$ 的所有向量 $\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3$;

(2) 对 (1) 中的任意向量 $\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3$, 证明 $\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3$ 线性无关.

解 (1) 对增广矩阵 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\xi}_1)$ 作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{\xi}_1)=\begin{pmatrix}1&-1&-1&-1\\-1&1&1&1\\0&-4&-2&2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&-1&-1&-1\\0&2&1&1\\0&0&0&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&1&0&0\\0&2&1&1\\0&0&0&0\end{pmatrix},$$

方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\xi}_1$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=(0,0,1)^{\mathrm{T}}+k(-1,1,-2)^{\mathrm{T}}$, 从而 $\xi_2=(-k,k,1-2k)^{\mathrm{T}}, k$ 为任意常数.

$\boldsymbol{A}^2=\begin{pmatrix}2&2&0\\-2&-2&0\\4&4&0\end{pmatrix}$, 对增广矩阵 $(\boldsymbol{A}^2,\boldsymbol{\xi}_1)$ 作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A}^2,\boldsymbol{\xi}_1)=\begin{pmatrix}2&2&0&1\\-2&-2&0&-1\\4&4&0&2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}2&2&0&-1\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{pmatrix},$$

于是方程组 $\boldsymbol{A}^2\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\xi}_1$ 的通解为 $x_1=-\dfrac{1}{2}-u, x_2=u, x_3=v$, 即 $\boldsymbol{\xi}_3=\left(-\dfrac{1}{2}-u,u,v\right)^{\mathrm{T}}$, 其中 u,v 为任意常数.

(2) 对任意的常数 k,u,v 有

$$|\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3|=\begin{vmatrix}-1&-k&-\frac{1}{2}-u\\1&k&u\\-2&1-2k&v\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}0&0&-\frac{1}{2}\\1&k&u\\-2&1-2k&v\end{vmatrix}=-\frac{1}{2}\neq0,$$

因此对任意向量 $\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3$, 恒有 $\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3$ 线性无关.

21.(本题满分 11 分)

设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=ax_1^2+ax_2^2+(a-1)x_3^2+2x_1x_3-2x_2x_3$.

(1) 求二次型 f 的矩阵的所有特征值;

(2) 若二次型 f 的规范形为 $y_1^2+y_2^2$, 求 a 的值.

解 (1) 二次型 f 的矩阵为 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} a & 0 & 1 \\ 0 & a & -1 \\ 1 & -1 & a-1 \end{pmatrix}$, 由于

$$|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix} \lambda-a & 0 & -1 \\ 0 & \lambda-a & 1 \\ -1 & 1 & \lambda-a+1 \end{vmatrix}=(\lambda-a)\big(\lambda-(a+1)\big)\big(\lambda-(a-2)\big),$$

所以 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $\lambda_1=a,\lambda_2=a+1,\lambda_3=a-2$.

(2) 因为二次型 f 的规范形为 $y_1^2+y_2^2$, 说明正惯性指数 $p=2$, 负惯性指数 $q=0$, 因此矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为两正一零, 显然 $a-2<a<a+1$, 因此必有 $a=2$.

22.(本题满分 11 分)

设二维随机变量 (X,Y) 的概率密度为 $f(x,y)=\begin{cases} \mathrm{e}^{-y}, & 0<y<x \\ 0, & 其他 \end{cases}$.

(1) 求条件概率密度 $f_{Y|X}(y|x)$;

(2) 求条件概率 $P(X\leqslant 1|Y\leqslant 1)$.

解 (1) X 的概率密度为

$$f_X(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x,y)\,\mathrm{d}y=\begin{cases} \displaystyle\int_0^x \mathrm{e}^{-x}\mathrm{d}y, & x>0 \\ 0, & 其他 \end{cases}=\begin{cases} x\mathrm{e}^{-x}, & x>0 \\ 0, & 其他 \end{cases},$$

Y 的条件概率密度为

$$f_{Y|X}(y|x)=\frac{f(x,y)}{f_X(x)}=\begin{cases} \dfrac{1}{x}, & 0<y<x \\ 0, & 其他 \end{cases}.$$

(2) Y 的概率密度为

$$f_Y(y)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x,y)\,\mathrm{d}x=\begin{cases} \displaystyle\int_y^{+\infty} \mathrm{e}^{-x}\mathrm{d}x, & y>0 \\ 0, & 其他 \end{cases}=\begin{cases} \mathrm{e}^{-y}, & y>0 \\ 0, & 其他 \end{cases},$$

因此条件概率

$$P(X\leqslant 1,Y\leqslant 1)=\frac{P(X\leqslant 1,Y\leqslant 1)}{P(Y\leqslant 1)}=\frac{\int_{-\infty}^1\int_{-\infty}^1 f(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\int_0^1 \mathrm{e}^{-y}\mathrm{d}y}$$

$$= \frac{\int_0^1 \mathrm{d}x \int_0^x \mathrm{e}^{-x} \mathrm{d}y}{1 - \mathrm{e}^{-1}} = \frac{\mathrm{e}-2}{\mathrm{e}-1}.$$

23.(**本题满分 11 分**)

袋中有 1 个红球、2 个黑球与 3 个白球. 现有放回地从袋中取两次, 每次取一个球. 以 X, Y, Z 分别表示两次取球所得的红球、黑球与白球的个数.

(1) 求 $P(X=1|Z=0)$;

(2) 求二维随机变量 (X, Y) 的概率分布.

解 (1) $P(X=1|Z=0) = \dfrac{P(X=1, Z=0)}{P(Z=0)} = \dfrac{\mathrm{C}_2^1 \frac{1}{6} \times \frac{1}{3}}{\left(\frac{1}{2}\right)^2} = \dfrac{4}{9}$.

(2) 由题意知 X, Y 的所有可能取值均为 $0, 1, 2$.

$$P(X=0, Y=0) = \frac{3}{6} \times \frac{3}{6} = \frac{1}{4}, \quad P(X=0, Y=1) = 2 \times \frac{2}{6} \times 36 = \frac{1}{3},$$
$$P(X=0, Y=2) = \left(\frac{2}{6}\right)^2 = \frac{1}{9}, \quad P(X=1, Y=0) = 2 \times \frac{1}{6} \times \frac{3}{6} = \frac{1}{6},$$
$$P(X=1, Y=1) = 2 \times \frac{1}{6} \times \frac{2}{6} = \frac{1}{9}, \quad P(X=2, Y=0) = \left(\frac{1}{6}\right)^2 = \frac{1}{36},$$
$$P(X=1, Y=2) = P(X=2, Y=1) = P(X=2, Y=2) = 0.$$

因此 (X, Y) 的概率分布为

X \ Y	0	1	2
0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
1	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{9}$	0
2	$\frac{1}{36}$	0	0

5　2010 年考研数学三

一　选择题, $1\sim 8$ 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 若 $\lim\limits_{x\to 0}\left[\dfrac{1}{x}-\left(\dfrac{1}{x}-a\right)\mathrm{e}^x\right]=1$, 则 $a=$ (　)

A. 0　　B. 1　　C. 2　　D. 3

解　由 $\lim\limits_{x\to 0}\left[\dfrac{1}{x}-\left(\dfrac{1}{x}-a\right)\mathrm{e}^x\right]=\lim\limits_{x\to 0}\left[\dfrac{1}{x}(1-\mathrm{e}^x)+a\mathrm{e}^x\right]=\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{1-\mathrm{e}^x}{x}+a=-1+a=1$ 可得 $a=2$, 选 C.

2. 设 y_1,y_2 是一阶线性非齐次微分方程 $y'+p(x)y=q(x)$ 的两个特解, 若常数 λ,μ 使 $\lambda y_1+\mu y_2$ 是该方程的解, $\lambda y_1-\mu y_2$ 是该方程对应的齐次方程的解, 则 (　)

A. $\lambda=\dfrac{1}{2},\mu=\dfrac{1}{2}$　　B. $\lambda=-\dfrac{1}{2},\mu=-\dfrac{1}{2}$

C. $\lambda=\dfrac{2}{3},\mu=\dfrac{1}{3}$　　D. $\lambda=\dfrac{2}{3},\mu=\dfrac{2}{3}$

解　$\lambda y_1+\mu y_2$ 是非齐次方程的解, 则 $\lambda+\mu=1$, 而 $\lambda y_1-\mu y_2$ 是对应的齐次方程的解, 则 $\lambda-\mu=0$, 因此 $\lambda=\mu=\dfrac{1}{2}$.

提示: 如果 $y_1,y_2,\cdots,y_n$ 是非齐次方程的 n 个解, 则线性组合 $C_1y_1+C_2y_2+\cdots+C_ny_n$ 仍然是此非齐次方程的解的充要条件是 $C_1+C_2+\cdots+C_n=1$, $C_1y_1+C_2y_2+\cdots+C_ny_n$ 是对应齐次方程的解的充要条件是 $C_1+C_2+\cdots+C_n=0$,

3. 设函数 $f(x),g(x)$ 具有二阶导数, 且 $g''(x)<0$. 若 $g(x_0)=a$ 是 $g(x)$ 的极值, 则 $f\big(g(x)\big)$ 在 x_0 处取极大值的一个充分条件是 (　)

A. $f'(a)<0$　　B. $f'(a)>0$　　C. $f''(a)<0$　　D. $f''(a)>0$

解　首先有题意有 $g(x_0)=a, g'(x_0)=0, g''(x_0)<0$, 要想 $f(g(x))$ 在 x_0 处取极大值, 首先 $\left[f\big(g(x)\big)\right]'\big|_{x=x_0}=f'\big(g(x_0)\big)g'(x_0)=0$, 它的一个充分条件是 $\left[f\big(g(x)\big)\right]''\big|_{x=x_0}<0$, 即

$$\left[f''\big(g(x)\big)g'^2(x)+f'\big(g(x)\big)g''(x)\right]\big|_{x=x_0}=f'(a)g''(x_0)<0,$$

而 $g''(x_0)<0$, 因此 $f'(a)>0$, 选 B.

4. 设 $f(x)=\ln^{10}x, g(x)=x, h(x)=\mathrm{e}^{\frac{x}{10}}$, 则当 x 充分大时有 (　)

A. $g(x)<h(x)<f(x)$　　B. $h(x)<g(x)<f(x)$

C. $f(x) < g(x) < h(x)$ D. $g(x) < f(x) < h(x)$

解 由洛必达法则知 $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{g(x)}{h(x)} = 0$, $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{f(x)}{g(x)} = \lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{\ln^{10}x}{x} = \left(\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{\ln x}{x^{\frac{1}{10}}}\right)^{10} = 0$, 因此当 x 充分大时, $f(x) < g(x) < h(x)$, 选 C.

5. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 $m\times n$ 矩阵, $\boldsymbol{B}$ 为 $n\times m$ 矩阵, $\boldsymbol{E}$ 为 m 阶单位矩阵, 若 $\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{E}$, 则 ( )

A. 秩 $r(\boldsymbol{A}) = m$, 秩 $r(\boldsymbol{B}) = m$ B. 秩 $r(\boldsymbol{A}) = m$, 秩 $r(\boldsymbol{B}) = n$

C. 秩 $r(\boldsymbol{A}) = n$, 秩 $r(\boldsymbol{B}) = m$ D. 秩 $r(\boldsymbol{A}) = n$, 秩 $r(\boldsymbol{B}) = n$

解 由题意有 $m = r(\boldsymbol{E}) = r(\boldsymbol{AB}) \leqslant r(\boldsymbol{A}) \leqslant \min\{m,n\}$, 因此 $r(\boldsymbol{A}) = m \leqslant n$, 同理 $r(\boldsymbol{B}) = m \leqslant n$, 选 A.

6. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 4 阶实对称矩阵, 且 $\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A}=\boldsymbol{O}$, 若 $\boldsymbol{A}$ 的秩为 3, 则 $\boldsymbol{A}$ 相似于 ( )

A. $\begin{pmatrix}1&&&\\&1&&\\&&1&\\&&&0\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}1&&&\\&1&&\\&&-1&\\&&&0\end{pmatrix}$

C. $\begin{pmatrix}1&&&\\&-1&&\\&&-1&\\&&&0\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}-1&&&\\&-1&&\\&&-1&\\&&&0\end{pmatrix}$

解 由 $\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{A}=\boldsymbol{O}$ 知 $\boldsymbol{A}$ 的任一特征值 λ 必满足 $\lambda^2+\lambda=0$, 则 $\lambda=0$ 或 -1. 又 $r(\boldsymbol{A}) = 3$, 所以 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $-1,-1,-1,0$, 且 $\boldsymbol{A}$ 为实对称矩阵, 则它相似于 $\mathrm{diag}\{-1,-1,-1,0\}$, 选 D.

7. 设随机变量 X 的分布函数为 $F(x) = \begin{cases}0, & x<0\\ \dfrac{1}{2}, & 0\leqslant x<1\\ 1-\mathrm{e}^{-x}, & x\geqslant 1\end{cases}$, 则 $P(X=1) =$ ( )

A. 0 B. $\dfrac{1}{2}$ C. $\dfrac{1}{2}-\mathrm{e}^{-1}$ D. $1-\mathrm{e}^{-1}$

解 $P(X=1) = F(1)-F(1-) = 1-\mathrm{e}^{-1}-\dfrac{1}{2} = \dfrac{1}{2}-\mathrm{e}^{-1}$, 选 C.

8. 设 $f_1(x)$ 为标准正态分布的概率密度, $f_2(x)$ 为 $[-1,3]$ 上均匀分布的概率密度, 若 $f(x) = \begin{cases}af_1(x), & x\leqslant 0\\ bf_2(x), & x>0\end{cases}$ $(a>0, b>0)$ 为概率密度, 则 a,b 应满足 ( )

A. $2a+3b=4$ B. $3a+2b=4$ C. $a+b=1$ D. $a+b=2$

解 $f(x)$ 需要满足 $\displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\mathrm{d}x = a\int_{-\infty}^{0} f_1(x)\,\mathrm{d}x + b\int_0^3 f_2(x)\,\mathrm{d}x = \frac{1}{2}a+\frac{3}{4}b = 1$, 即 $2a+3b=4$, 选 A.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设可导函数 $y=y(x)$ 由方程 $\int_0^{x+y} \mathrm{e}^{-t^2} \mathrm{d}t = \int_0^x x\sin t^2 \,\mathrm{d}t$ 确定, 则 $\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{x=0} =$ ________.

解 当 $x=0$ 时 $y=0$, 原方程两边对 x 求导得 $\mathrm{e}^{x+y}\left(1+y'\right) = x\sin x^2 + \int_0^x \sin t^2 \,\mathrm{d}t$, 代入 $x=y=0$ 得 $y'=-1$, 即 $\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{x=0} = -1$.

10. 设位于曲线 $y=\dfrac{1}{\sqrt{x\left(1+\ln^2 x\right)}}\ (\mathrm{e}\leqslant x<+\infty)$ 下方, x 轴上方的无界区域为 G, 则 G 绕 x 轴旋转一周所得空间区域的体积为________.

解 所求旋转体的体积为 $V=\pi\int_{\mathrm{e}}^{+\infty} \dfrac{\mathrm{d}x}{x\left(1+\ln^2 x\right)} = \pi\arctan(\ln x)\big|_{\mathrm{e}}^{+\infty} = \dfrac{\pi^2}{4}$.

11. 设某商品的收益函数为 $R(p)$, 收益弹性为 $1+p^3$, 其中 p 为价格, 且 $R(1)=1$, 则 $R(p)=$________.

解 由收益弹性的定义知 $\dfrac{ER}{Ep} = \dfrac{p}{R}\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}p} = 1+p^3$, 解此变量分离的方程得 $\ln R = \dfrac{1}{3}p^3 + \ln p + C$, 代入 $R(1)=1$ 得 $C+-\dfrac{1}{3}$, 因此收益函数 $R(p) = p\mathrm{e}^{\frac{1}{3}(p^3-1)}$.

12. 若曲线 $y=x^3+ax^2+bx+1$ 有拐点 $(-1,0)$, 则 $b=$________.

解 由条件有 $\begin{cases} y(-1) = -1+a-b+1=0 \\ y''(-1) = -6+2a=0 \end{cases}$, 解得 $a=b=3$.

13. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 为 3 阶矩阵, 且 $|\boldsymbol{A}|=3, |\boldsymbol{B}|=2, |\boldsymbol{A}^{-1}+\boldsymbol{B}|=2$, 则 $|\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}^{-1}|=$________.

解 $\left|\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}^{-1}\right| = \left|\boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}^{-1}\right)\boldsymbol{B}^{-1}\right| = |\boldsymbol{A}|\left|\boldsymbol{B}+\boldsymbol{A}^{-1}\right|\left|\boldsymbol{B}^{-1}\right| = 3\times 2\times\dfrac{1}{2} = 3$.

14. 设 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是来自总体 $N(\mu,\sigma^2)\ (\sigma>0)$ 的简单随机样本. 记统计量 $T=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^n X_i^2$, 则 $ET=$________.

解 $E(T) = E\left(\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^n X_i^2\right) = EX_1^2 = (EX_1)^2 + DX_1 = \mu^2+\sigma^2$.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to+\infty}\left(x^{\frac{1}{x}}-1\right)^{\frac{1}{\ln x}}$.

解 先取对数利用洛必达法则得

$$\lim_{x\to+\infty}\frac{\ln\left(x^{\frac{1}{x}}-1\right)}{\ln x} = \lim_{x\to+\infty}\frac{\mathrm{e}^{\frac{\ln x}{x}}\frac{1-\ln x}{x^2}}{\frac{1}{x}\left(x^{\frac{1}{x}}-1\right)}$$

$$= \lim_{x\to+\infty}\frac{1-\ln x}{x\left(\mathrm{e}^{\frac{\ln x}{x}}-1\right)} = \lim_{x\to+\infty}\frac{1-\ln x}{x\cdot\frac{\ln x}{x}} = -1,$$

因此原极限为 e^{-1}.

16.(**本题满分** 10 **分**)

计算二重积分 $\iint\limits_D (x+y)^3\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, 其中 D 由曲线 $x=\sqrt{1+y^2}$ 与直线 $x+\sqrt{2}y=0$ 及 $x-\sqrt{2}y=0$ 围成.

解 显然积分区域是关于 x 轴对称的, 记 $D_1=\{(x,y)|0\leqslant y\leqslant 1,\sqrt{2}y\leqslant x\leqslant\sqrt{1+y^2}\}$ 为 D 在第一象限的部分, 则所求二重积分为

$$\begin{aligned}
I &= \iint\limits_D (x+y)^3\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y = \iint\limits_D \left(x^3+3x^2y+3xy^2+y^3\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \\
&= \iint\limits_D \left(3x^2y+y^3\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y + \iint\limits_D \left(x^3+3xy^2\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \\
&= 2\iint\limits_{D_1} \left(x^3+3xy^2\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y = 2\int_0^1\mathrm{d}y\int_{\sqrt{2}y}^{\sqrt{1+y^2}}\left(x^3+3xy^2\right)\mathrm{d}x \\
&= 2\int_0^1\left(\frac{1}{4}x^4+\frac{3}{2}x^2y^2\right)\Big|_{\sqrt{2}y}^{\sqrt{1+y^2}}\mathrm{d}y \\
&= 2\int_0^1\left[\frac{\left(1+y^2\right)^2-4y^4}{4}+\frac{3}{2}y^2\left(1+y^2-2y^2\right)\right]\mathrm{d}y \\
&= \int_0^1\left[\frac{1}{2}\left(1+2y^2-3y^4\right)+3y^2\left(1-y^2\right)\right]\mathrm{d}y \\
&= \frac{1}{2}\left(1+\frac{2}{3}-\frac{3}{5}\right)+3\left(\frac{1}{3}-\frac{1}{5}\right)=\frac{14}{15}.
\end{aligned}$$

17.(**本题满分** 10 **分**)

求函数 $u=xy+2yz$ 在约束条件 $x^2+y^2+z^2=10$ 下的最大值和最小值.

解 令 $F(x,y,z,\lambda)=xy+2yz+\lambda(x^2+y^2+z^2-10)$, 令

$$\begin{cases}
F'_x = y+2\lambda x=0 \\
F'_y = x+2z+2\lambda y=0 \\
F'_z = 2y+2\lambda z=0 \\
F'_\lambda = x^2+y^2+z^2-10=0
\end{cases}$$

当 $\lambda\neq 0$ 时, 由前三个方程消去参数 λ 可得 $\dfrac{y}{2x}=\dfrac{2+2z}{2y}=\dfrac{y}{z}$, 代入第四个方程

求得四个驻点为 $P_1=\left(1,-\sqrt{5},2\right)$, $P_2=\left(1,\sqrt{5},2\right)$, $P_3=\left(-1,-\sqrt{5},-2\right)$, $P_4=\left(-1,\sqrt{5},-2\right)$, 此时 $u(P_1)=u(P_4)=-5\sqrt{5}$, $u(P_2)=u(P_3)=5\sqrt{5}$. 当 $\lambda=0$ 时, 不难得到另外两个驻点为 $P_5=\left(-2\sqrt{2},0,\sqrt{2}\right)$, $P_6=\left(2\sqrt{2},0,-\sqrt{2}\right)$, 此时 $u(P_5)=u(P_6)=0$. 因此函数 $u=xy+2yz$ 在约束条件 $x^2+y^2+z^2=10$ 下的最大值和最小值分别为 $5\sqrt{5}$ 和 $-5\sqrt{5}$.

18.(本题满分 10 分)

(1) 比较 $\int_0^1|\ln t|[\ln(1+t)]^n\,\mathrm{d}t$ 与 $\int_0^1 t^n|\ln t|\,\mathrm{d}t\,(n=1,2,\cdots)$ 的大小, 说明理由.

(2) 记 $u_n=\int_0^1|\ln t|[\ln(1+t)]^n\,\mathrm{d}t\,(n=1,2,\cdots)$, 求极限 $\lim\limits_{n\to\infty}u_n$.

解 (1) 当 $0<t<1$ 时, $0<\ln(1+t)<t$, 所以 $|\ln t|\,[\ln(1+t)]^n<t^n\,|\ln t|$, 由定积分保序性可知 $\int_0^1|\ln t|[\ln(1+t)]^n\,\mathrm{d}t<\int_0^1 t^n|\ln t|\,\mathrm{d}t$.

(2) 由 (1) 可知, 当 $0<t<1$ 时, $0<\int_0^1|\ln^n t\ln(1+t)|\mathrm{d}t<\int_0^1|\ln t|t^n\mathrm{d}t$. 由分部积分得

$$\int_0^1|\ln t|\,t^n\,\mathrm{d}t=-\int_0^1\ln t\,\mathrm{d}\left(\frac{t^{n+1}}{n+1}\right)=\frac{1}{n+1}\int_0^1 t^n\,\mathrm{d}t=\frac{1}{(n+1)^2},$$

因此 $0<u_n<\dfrac{1}{(n+1)^2}$, 由夹逼准则知 $\lim\limits_{n\to\infty}u_n=0$.

19.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x)$ 在 $[0,3]$ 上连续, 在 $(),3)$ 内存在二阶导数, 且

$$2f(0)=\int_0^2 f(x)\,\mathrm{d}x=f(2)+f(3).$$

(1) 证明存在 $\eta\in(0,2)$, 使得 $f(\eta)=f(0)$;

(2) 证明存在 $\xi\in(0,3)$, 使得 $f''(\xi)=0$.

证 (1) 令 $F(t)=\int_0^t f(x)\,\mathrm{d}x$, 则由拉格朗日中值定理知存在 $\eta\in(0,2)$, 使得 $F(2)-F(0)=2F'(\eta)$, 即 $2f(0)=\int_0^2 f(x)\,\mathrm{d}x=2f(\eta)$, $f(\eta)=f(0)$.

(2) 设 $f(x)$ 在 $[2,3]$ 上的最小值和最大值分别为 m 和 M, 则 $m\leqslant\dfrac{f(2)+f(3)}{2}\leqslant M$, 因此由介值定理知存在 $\zeta\in[2,3]$ 使得 $f(\zeta)=\dfrac{f(2)+f(3)}{2}=f(\eta)$. 根据罗尔定理知存在 $\xi_1\in(0,\eta)$, $\xi_2\in(\eta,\zeta)$ 使得 $f'(\xi_1)=f'(\xi_2)=0$, 进一步存在 $\xi\in(\xi_1,\xi_2)\subset(0,2)$ 使得 $f''(\xi)=0$.

20.(本题满分 11 分)

设 $A=\begin{pmatrix}\lambda & 1 & 1\\ 0 & \lambda-1 & 0\\ 1 & 1 & \lambda\end{pmatrix}$, $b=\begin{pmatrix}a\\1\\1\end{pmatrix}$, 已知线性方程组 $Ax=b$ 存在两个不同的解.

(1) 求 λ, a;

(2) 求方程组 $Ax=b$ 的通解.

解 (1) 因为方程组 $Ax=b$ 有两个不同的解, 所以 $r(A)=r(\bar{A})<3$, 于是

$$|A|=\begin{vmatrix}\lambda & 1 & 1\\ 0 & \lambda-1 & 0\\ 1 & 1 & \lambda\end{vmatrix}=(\lambda-1)\begin{vmatrix}\lambda & 1\\ 1 & \lambda\end{vmatrix}=(\lambda+1)(\lambda-1)^2=0,$$

因此 $\lambda=\pm1$. 当 $\lambda=1$ 时, $\bar{A}\to\begin{pmatrix}1 & 1 & 1 & a\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 1 & 1 & 1\end{pmatrix}$, 显然 $r(A)=1, r(\bar{A})=2$, 方程组无解, 因此 $\lambda=1$ 舍去. 当 $\lambda=-1$ 时, 对 $Ax=b$ 的增广矩阵进行初等行变换得

$$(A,b)=\begin{pmatrix}-1 & 1 & 1 & a\\ 0 & -2 & 0 & 1\\ 1 & 1 & -1 & 1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1 & 0 & -1 & \frac{3}{2}\\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{2}\\ 0 & 0 & 0 & a+2\end{pmatrix},$$

因为方程组 $Ax=b$ 有解, 所以 $a=-2$.

(2) 当 $\lambda=-1, a=-2$ 时, $\bar{A}=(A,b)\to\begin{pmatrix}1 & 0 & -1 & \frac{3}{2}\\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{2}\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$, 因此方程组 $Ax=b$ 的通解为 $x=\left(\frac{3}{2},-\frac{1}{2},0\right)^{\mathrm{T}}+k(1,0,1)^{\mathrm{T}}$, 其中 k 为任意常数.

21.(本题满分 11 分)

已知二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=x^{\mathrm{T}}Ax$ 在正交变换 $x=Qy$ 下的标准形为 $y_1^2+y_2^2$, 且 Q 的第 3 列为 $\left(\frac{\sqrt{2}}{2},0,\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{\mathrm{T}}$.

(1) 求矩阵 A;

(2) 证明 $A+E$ 为正定矩阵, 其中 E 为 3 阶单位矩阵.

解 (1) 二次型 f 在正交变换 $x=Qy$ 下的标准形为 $y_1^2+y_2^2$, 因此矩阵 A 的特征值为 1, 1, 0, 于是 $Q^{-1}AQ=Q^{\mathrm{T}}AQ=\mathrm{diag}\{1,1,0\}$, 且矩阵 Q 的第三列就是属于特征值 0 的特征向量. 设 $(x_1,x_2,x_3)^{\mathrm{T}}$ 是 A 的属于特征值 1 的特征向量, 由于实对称矩阵不同特征值对应的特征向量互相正交, 则 $x_1+x_3=0$, 解得 $\xi_1=$

$\dfrac{\sqrt{2}}{2}(1,0,-1)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\xi}_2 = (0,1,0)^{\mathrm{T}}$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的属于特征值 1 的连个正交的单位特征向量, 于是可取 $\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}$, 此时有 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q} = \mathrm{diag}\{1,1,0\}$, 于是

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{Q}\begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 0 \end{pmatrix}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

(2) 因为 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $1,1,0$, 所以 $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{E}$ 的特征值为 $2,2,1$, 且 $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{E}$ 为实对称矩阵, 所以 $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{E}$ 为正定矩阵.

22.(本题满分 11 分)

设二维随机变量 (X,Y) 的概率密度为

$$f(x,y) = A\mathrm{e}^{-2x^2+2xy-y^2}, -\infty < x < +\infty, -\infty < y < +\infty,$$

求常数 A 及条件概率密度 $f_{Y|X}(y|x)$.

解 X 的边缘概率密度为

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\,\mathrm{d}y = A\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{e}^{-2x^2+2xy-y^2}\mathrm{d}y \\ &= A\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{e}^{-(y-x)^2-x^2}\mathrm{d}y = A\mathrm{e}^{-x^2}\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{e}^{-(y-x)^2}\mathrm{d}y = A\sqrt{\pi}\mathrm{e}^{-x^2}, \end{aligned}$$

于是 $1 = \displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x)\,\mathrm{d}x = A\sqrt{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{e}^{-x^2}\mathrm{d}x = A\pi \Rightarrow A = \frac{1}{\pi}$.

当 $x \in (-\infty, +\infty)$ 时,

$$\begin{aligned} f_{Y|X}(y|x) &= \frac{f(x,y)}{f_X(x)} = \frac{\frac{1}{\pi}\mathrm{e}^{-2x^2+2xy-y^2}}{\frac{1}{\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-x^2}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-x^2+2xy-y^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-(x-y)^2}, \quad -\infty < y < +\infty. \end{aligned}$$

23.(本题满分 11 分)

箱中装有 6 个球, 其中红、白、黑球的个数分别为 $1,2,3$ 个. 现从箱中随机地取出 2 个球, 记 X 为取出的红球个数, Y 为取出的白球个数.

(1) 求随机变量 (X,Y) 的概率分布;

(2) 求 $\mathrm{Cov}(X,Y)$.

解 (1) 由题意可知

$$P(X=0,Y=0)=\frac{C_3^2}{C_6^2}=\frac{1}{5},\ P(X=0,Y=1)=\frac{C_2^1C_3^1}{C_6^2}=\frac{2}{5},$$
$$P(X=0,Y=2)=\frac{C_2^2}{C_6^2}=\frac{1}{15},\ P(X=1,Y=0)=\frac{C_3^1}{C_6^2}=\frac{1}{5},$$
$$P(X=1,Y=1)=\frac{C_2^1}{C_6^2}=\frac{2}{15},\ P(X=1,Y=2)=0.$$

因此随机变量 (X,Y) 的概率分布为

$X \backslash Y$	0	1	2	$P(X=i)$
0	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{2}{3}$
1	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{15}$	0	$\frac{1}{3}$
$P(Y=j)$	$\frac{2}{5}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{1}{15}$	

(2) 由 (X,Y) 的分布可计算得 $EX=\frac{1}{3}, EY=\frac{2}{3}, E(XY)=\frac{2}{15}$, 于是 $\mathrm{Cov}(X,Y)=E(XY)-(EX)(EY)=\frac{2}{15}-\frac{1}{3}\times\frac{2}{3}=-\frac{4}{45}$.

6　2011 年考研数学三

一　选择题, 1 ~ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 已知当 $x \to 0$ 时, $f(x) = 3\sin x - \sin 3x$ 与 cx^k 是等价无穷小, 则 (　)

A. $k = 1, c = 4$　　B. $k = 1, c = -4$　　C. $k = 3, c = 4$　　D. $k = 3, c = -4$

解　利用麦克劳林公式得

$$f(x) = 3\left(x - \frac{x^3}{6} + o\left(x^3\right)\right) - \left(3x - \frac{(3x)^3}{6} + o\left(x^3\right)\right) = 4x^3 + o\left(x^3\right) \sim 4x^3,$$

因此 $k = 3, c = 4$, 选 C.

提示: 事实上, 利用正弦函数的三倍角公式 $\sin 3x = 3\sin x - \sin^3 x$ 更快.

2. 设函数 $f(x)$ 在 $x = 0$ 处可导, 且 $f(0) = 0$, 则 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{x^2 f(x) - 2f(x^3)}{x^3} =$ (　)

A. $-2f'(0)$　　B. $-f'(0)$　　C. $f'(0)$　　D. 0

解　注意到 $f(0) = 0$, 利用导数定义得

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{x^2 f(x) - 2f\left(x^3\right)}{x^3} &= \lim_{x\to 0}\frac{x^2 f(x)}{x^3} - 2\lim_{x\to 0}\frac{f\left(x^3\right)}{x^3} \\ &= f'(0) - 2f'(0) = -f'(0),\end{aligned}$$

因此选 B.

3. 设 $\{u_n\}$ 是数列, 则下列命题正确的是 (　)

A. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(u_{2n-1} + u_{2n})$ 收敛

B. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(u_{2n-1} + u_{2n})$ 收敛, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛

C. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(u_{2n-1} - u_{2n})$ 收敛

D. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(u_{2n-1} - u_{2n})$ 收敛, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛

解 收敛的级数任意加括号后的级数仍然收敛, A 选项正确; B 选项不正确, 反例可取 $u_n=(-1)^n$; C 选项不正确, 反例可取 $u_n=\dfrac{(-1)^n}{n}$; D 选项不正确, 反例可取 $u_n=1$, 因此选 A.

4. 设 $I=\int_0^{\frac{\pi}{4}}\ln\sin x\mathrm{d}x$, $J=\int_0^{\frac{\pi}{4}}\ln\cot x\mathrm{d}x$, $K=\int_0^{\frac{\pi}{4}}\ln\cos x\mathrm{d}x$, 则 I,J,K 的大小关系是 ( )

A. $I<J<K$ B. $I<K<J$ C. $J<I<K$ D. $K<J<I$

解 当 $0<x<\dfrac{\pi}{4}$ 时, $\sin x<\cos x<\cot x$, 即 $\ln\sin x<\ln\cos x<\ln\cot x$, 因此 $I<K<J$, 选 B.

5. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 3 阶矩阵, 将 $\boldsymbol{A}$ 的第二列加到第一列得矩阵 $\boldsymbol{B}$, 再交换 $\boldsymbol{B}$ 的第二行与第一行得单位矩阵. 记 $\boldsymbol{P}_1=\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{P}_2=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{A}=$ ( )

A. $\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2$ B. $\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{P}_2$ C. $\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1$ D. $\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1}$

解 由初等变换与初等矩阵的关系知 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_1=\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{B}=\boldsymbol{E}$, 所以 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{P}_1^{-1}=\boldsymbol{P}_2^{-1}\boldsymbol{P}_1^{-1}=\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1}$, 选 D.

6. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 4×3 矩阵, $\boldsymbol{\eta}_1,\boldsymbol{\eta}_2,\boldsymbol{\eta}_3$ 是非齐次线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 的 3 个线性无关的解, k_1,k_2 为任意常数, 则 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 的通解为 ( )

A. $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2+\boldsymbol{\eta}_3}{2}+k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)$

B. $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_3}{2}+k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)$

C. $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2+\boldsymbol{\eta}_3}{2}+k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)+k_2(\boldsymbol{\eta}_3-\boldsymbol{\eta}_1)$

D. $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_3}{2}+k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)+k_2(\boldsymbol{\eta}_3-\boldsymbol{\eta}_1)$

解 首先 $\boldsymbol{A}$ 不是零矩阵, 因此齐次线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 至多只有两个线性无关的解. 因为 $\boldsymbol{\eta}_1,\boldsymbol{\eta}_2,\boldsymbol{\eta}_3$ 是方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 的 3 个线性无关的解, 所以 $\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1,\boldsymbol{\eta}_3-\boldsymbol{\eta}_1$ 是方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的两个线性无关的解, 于是方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的通解为 $k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)+k_2(\boldsymbol{\eta}_3-\boldsymbol{\eta}_1)$. 且 $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2+\boldsymbol{\eta}_3}{2}$ 仍然是方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 的解, 因此方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 的通解为 $\dfrac{\boldsymbol{\eta}_2+\boldsymbol{\eta}_3}{2}+k_1(\boldsymbol{\eta}_2-\boldsymbol{\eta}_1)+k_2(\boldsymbol{\eta}_3-\boldsymbol{\eta}_1)$, 选 D.

7. 设 $F_1(x)$ 与 $F_2(x)$ 为两个分布函数, 其相应的概率密度 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 是连续函数, 则必为概率密度的是 ( )

A. $f_1(x)f_2(x)$ B. $2f_2(x)F_1(x)$

C. $f_1(x)F_2(x)$ D. $f_1(x)F_2(x)+f_2(x)F_1(x)$

解 概率密度需要满足非负性和归一性, 非负性都满足, 直接验证

$$\int_{-\infty}^{+\infty}[f_1(x)F_2(x)+f_2(x)F_1(x)]\,\mathrm{d}x=F_1(x)F_2(x)\Big|_{-\infty}^{+\infty}=1,$$

因此 $f_1(x)F_2(x)+f_2(x)F_1(x)$ 为概率密度, 其他都不满足, 选 D.

提示: 在此题的条件下, $2f_1(x)F_1(x), 2f_2(x)F_2(x)$ 和 $f_1(x)F_1(x)+f_2(x)F_2(x)$ 都是概率密度.

8. 设总体 X 服从参数为 $\lambda(\lambda>0)$ 的泊松分布, $X_1,X_2,\cdots,X_n(n\geqslant 2)$ 为来自该总体的简单随机样本, 则对于统计量 $T_1=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}X_i$ 和 $T_2=\dfrac{1}{n-1}\sum\limits_{i=1}^{n-1}X_i+\dfrac{1}{n}X_n$, 有 ( )

A. $ET_1>ET_2, DT_1>DT_2$ B. $ET_1>ET_2, DT_1<DT_2$

C. $ET_1<ET_2, DT_1>DT_2$ D. $ET_1<ET_2, DT_1<DT_2$

解 $ET_1=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}EX_i=\lambda, ET_2=\dfrac{1}{n-1}\sum\limits_{i=1}^{n-1}EX_i+\dfrac{1}{n}EX_n=\lambda+\dfrac{\lambda}{n}>ET_1, DT_1=\dfrac{DX}{n}=\dfrac{\lambda}{n}, DT_2=D\left(\dfrac{1}{n-1}\sum\limits_{i=1}^{n-1}X_i\right)+D\left(\dfrac{1}{n}X_n\right)=\dfrac{DX}{n-1}+\dfrac{DX}{n^2}=\dfrac{\lambda}{n-1}+\dfrac{\lambda}{n^2}>DT_1$, 选 D.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设 $f(x)=\lim\limits_{t\to 0}x(1+3t)^{\frac{x}{t}}$, 则 $f'(x)=$________.

解 $f(x)=\lim\limits_{t\to 0}x(1+3t)^{\frac{x}{t}}=\lim\limits_{t\to 0}x(1+3t)^{\frac{3x}{3t}}=xe^{3x}$, 于是 $f'(x)=e^{3x}+3xe^{3x}$.

10. 设函数 $z=\left(1+\dfrac{x}{y}\right)^{\frac{x}{y}}$, 则 $dz\big|_{(1,1)}=$________.

解 $z=\left(1+\dfrac{x}{y}\right)^{\frac{x}{y}}=e^{\frac{x}{y}\ln\left(1+\frac{x}{y}\right)}$, 于是

$$\frac{\partial z}{\partial x}=\left(1+\frac{x}{y}\right)\left[\frac{1}{y}\ln\left(1+\frac{x}{y}\right)+\frac{x}{y}\cdot\frac{1/y}{1+x/y}\right],$$
$$\frac{\partial z}{\partial y}=\left(1+\frac{x}{y}\right)^{\frac{x}{y}}\left[\frac{x}{y^2}\ln\left(1+\frac{x}{y}\right)+\frac{x}{y}\cdot\frac{-x/y^2}{1+x/y}\right],$$

所以 $\dfrac{\partial z}{\partial x}\Big|_{(1,1)}=2\ln 2+1, \dfrac{\partial z}{\partial y}\Big|_{(1,1)}=-1-2\ln 2$, 从而 $dz\big|_{(1,1)}=(1+2\ln 2)(dx-dy)$.

11. 曲线 $\tan\left(x+y+\dfrac{\pi}{4}\right)=e^y$ 在点 $(0,0)$ 处的切线方程为________.

解 原方程两边对 x 求导得 $\sec^2\left(x+y+\dfrac{\pi}{4}\right)\cdot(1+y')=e^y y'$, 代入 $x=0, y=0$ 得 $y'(0)=-2$, 因此曲线在 $(0,0)$ 处的切线方程为 $y=-2x$.

12. 曲线 $y=\sqrt{x^2-1}$, 直线 $x=2$ 及 x 轴所围成的平面图形绕 x 轴选项所成的旋转体的体积为________.

解 利用旋转体的体积公式得 $V=\pi\displaystyle\int_1^2(x^2-1)dx=\pi\left(\frac{1}{3}x^3-x\right)\Big|_1^2=\frac{4\pi}{3}$.

13.设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$ 的秩为 1, $\boldsymbol{A}$ 的各行元素之和为 3, 则 f 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 下的标准形为________.

解 由题意 $r(\boldsymbol{A})=1$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 至少有两个特征值是 0, 由于 $\boldsymbol{A}$ 的各行元素之和为 3, 即 $\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}3\\3\\3\end{pmatrix}=3\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}$, 因此 3 也是 $\boldsymbol{A}$ 的特征值, 则 $\boldsymbol{A}$ 的相似标准形为 $\mathrm{diag}\{3,0,0\}$, 因此二次型 f 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 下的标准形为 $3y_1^2$.

14.设二维随机变量 (X,Y) 服从正态分布 $N(\mu,\mu;\sigma^2,\sigma^2;0)$, 则 $E(XY^2)=$________.

解 由条件知 X,Y 相互独立且都服从正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$, 于是 $E(XY^2)=E(X)E(Y^2)=\mu((EX)^2+D(X))=\mu(\mu^2+\sigma^2)=\mu^3+\mu\sigma^2$.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to0}\dfrac{\sqrt{1+2\sin x}-x-1}{x\ln(1+x)}$.

解 当 $x\to0$ 时, $x-\sin x\sim\dfrac{x^3}{6}$, $(1+x)^\alpha-1-\alpha x\sim\dfrac{\alpha(\alpha-1)}{2}x^2$, 因此

$$\begin{aligned}\lim_{x\to0}\frac{\sqrt{1+2\sin x}-x-1}{x\ln(1+x)}&=\lim_{x\to0}\frac{(1+2\sin x)^{\frac12}-1-\frac12\cdot2\sin x+\sin x-x}{x^2}\\&=\lim_{x\to0}\frac{(1+2\sin x)^{\frac12}-1-\frac12\cdot2\sin x}{x^2}+\lim_{x\to0}\frac{\sin x-x}{x^2}\\&=\lim_{x\to0}\frac{-\frac18(2\sin x)^2}{x^2}+\lim_{x\to0}\frac{\frac16x^3}{x^2}=-\frac12.\end{aligned}$$

16.(本题满分 10 分)

设函数 $z=f\big(xy,yg(x)\big)$, 其中函数 f 具有二阶连续偏导数, 函数 $g(x)$ 可导且在 $x=1$ 处取得极值 $g(1)=1$, 求 $\left.\dfrac{\partial^2z}{\partial x\partial y}\right|_{\substack{x=1\\y=1}}$.

解 因为 $\dfrac{\partial z}{\partial x}=f_1'\big(xy,yg(x)\big)\cdot y+f_2'\big(xy,yg(x)\big)\cdot g'(x)\cdot y$, 所以 $\left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_{x=1}=yf_1'(y,y)$. 故

$$\begin{aligned}\left.\frac{\partial^2z}{\partial x\partial y}\right|_{\substack{x=1\\y=1}}&=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}\left(\left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_{x=1}\right)\Bigg|_{y=1}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}\left[yf_1'(y,y)\right]\Big|_{y=1}\\&=\left[f_1'(y,y)+y\left(f_{11}''(y,y)+f_{12}''(y,y)\right)\right]\Big|_{y=1}\\&=f_1'(1,1)+f_{11}''(1,1)+f_{12}''(1,1).\end{aligned}$$

17.(本题满分 10 分)

求不定积分 $\int \frac{\arcsin\sqrt{x}+\ln x}{\sqrt{x}}\mathrm{d}x$.

解

$$\begin{aligned}\int \frac{\arcsin\sqrt{x}+\ln x}{\sqrt{x}}\mathrm{d}x &= 2\int\left(\arcsin\sqrt{x}+\ln x\right)\mathrm{d}\left(\sqrt{x}\right)\\ &= 2\sqrt{x}\left(\arcsin\sqrt{x}+\ln x\right)-2\int\sqrt{x}\left(\frac{1}{2\sqrt{x}\sqrt{1-x}}+\frac{1}{x}\right)\mathrm{d}x\\ &= 2\sqrt{x}\left(\arcsin\sqrt{x}+\ln x\right)-\int\left(\frac{1}{\sqrt{1-x}}+\frac{2}{\sqrt{x}}\right)\mathrm{d}x\\ &= 2\sqrt{x}\left(\arcsin\sqrt{x}+\ln x\right)+2\sqrt{1-x}-4\sqrt{x}+C.\end{aligned}$$

18.(本题满分 10 分)

证明方程 $4\arctan x-x+\frac{4\pi}{3}-\sqrt{3}=0$ 恰有两个实根.

证 令 $f(x)=4\arctan x-x+\frac{4\pi}{3}-\sqrt{3}$, 则

$$f'(x)=\frac{4}{1+x^2}-1=\frac{3-x^2}{1+x^2}\begin{cases}>0, & -\sqrt{3}<x<\sqrt{3}\\ =0, & x=\pm\sqrt{3}\\ <0, & x<-\sqrt{3}\text{或}x>\sqrt{3}\end{cases}.$$

因此 $f(x)$ 在 $\left(-\infty,-\sqrt{3}\right)$ 和 $\left(\sqrt{3},+\infty\right)$ 内单调递减, 在 $\left(-\sqrt{3},\sqrt{3}\right)$ 内单调递增. 极小值 $f\left(-\sqrt{3}\right)=0$, 极大值 $f\left(\sqrt{3}\right)=0$, 且 $f(+\infty)=-\infty$, 因此由零点定理知存在 $x_0\in\left(\sqrt{3},+\infty\right)$ 使得 $f(x_0)=0$. 因此 $f(x)$ 恰有两个根 $x=\sqrt{3}$ 和 $x=x_0$.

19.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x)$ 在区间 $[0,1]$ 具有连续导数, $f(0)=1$, 且满足 $\iint\limits_{D_t} f'(x+y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\iint\limits_{D_t} f(t)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, $D_t=\{(x,y)|0\leqslant y\leqslant t-x, 0\leqslant x\leqslant t\}(0<t\leqslant 1)$, 求 $f(x)$ 的表达式.

解 因为

$$\begin{aligned}\iint\limits_{D_t} f'(x+y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y &= \int_0^t \mathrm{d}x\int_0^{t-x} f'(x+y)\mathrm{d}y\\ &= \int_0^t [f(t)-f(x)]\mathrm{d}x = tf(t)-\int_0^t f(x)\mathrm{d}x\\ &= \iint\limits_{D_t} f'(t)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{2}t^2 f(t),\end{aligned}$$

等式两边对 x 求导得 $f'(t)+\dfrac{2}{t-2}f(t)=0$, 解此变量分离的方程得 $f(t)=\dfrac{C}{(t-2)^2}$.

由 $f(0)=1$ 得 $C=4$, 所以 $f(x)$ 的表达式为 $f(x)=\dfrac{4}{(x-2)^2}, 0\leqslant x\leqslant 1$.

20.(**本题满分 11 分**)

设向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1=(1,0,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_2=(0,1,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_3=(1,3,5)^{\mathrm{T}}$ 不能由向量组 $\boldsymbol{\beta}_1=(1,1,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\beta}_2=(1,2,3)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\beta}_3=(3,4,a)^{\mathrm{T}}$ 线性表示.

(1) 求 a 的值;

(2) 将 $\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3$ 用 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性表示.

解 (1) 首先有 $|\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3|=\begin{vmatrix}1&0&1\\0&1&3\\1&1&5\end{vmatrix}=1\neq 0$, 于是向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关.

因此 $\boldsymbol{\alpha}_1=(1,0,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_2=(0,1,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\alpha}_3=(1,3,5)^{\mathrm{T}}$ 不能被 $\boldsymbol{\beta}_1=(1,1,1)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\beta}_2=(1,2,3)^{\mathrm{T}},\boldsymbol{\beta}_3=(3,4,a)^{\mathrm{T}}$ 线性表示等价于 $\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3$ 线性相关, 于是 $|\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3|=\begin{vmatrix}0&1&3\\0&1&1\\0&2&a-3\end{vmatrix}=a-5=0$, 所以 $a=5$.

(2) 对增广矩阵 $(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3)$ 作初等行变换得

$$
\begin{aligned}
\begin{pmatrix}1&0&1&1&1&3\\0&1&3&1&2&4\\1&1&5&1&3&5\end{pmatrix}&\to\begin{pmatrix}1&0&1&1&1&3\\0&1&3&1&2&4\\0&1&3&0&2&2\end{pmatrix}\\
&\to\begin{pmatrix}1&0&1&1&1&3\\0&1&3&1&2&4\\0&0&1&-1&0&-2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&0&2&1&5\\0&1&0&4&2&10\\0&0&1&-1&0&-2\end{pmatrix}.
\end{aligned}
$$

于是 $\boldsymbol{\beta}_1=2\boldsymbol{\alpha}_1+4\boldsymbol{\alpha}_2-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\beta}_2=\boldsymbol{\alpha}_1+2\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\beta}_3=5\boldsymbol{\alpha}_1+10\boldsymbol{\alpha}_2-2\boldsymbol{\alpha}_3$.

21.(**本题满分 11 分**)

设 $\boldsymbol{A}$ 为 3 阶实对称矩阵, $\boldsymbol{A}$ 的秩为 2, 且 $\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1&1\\0&0\\-1&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1&1\\0&0\\1&1\end{pmatrix}$.

(1) 求 $\boldsymbol{A}$ 的所有特征值与特征向量;

(2) 求矩阵 $\boldsymbol{A}$.

解 (1) 由条件知 $\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1\\0\\-1\end{pmatrix}=-\begin{pmatrix}1\\0\\-1\end{pmatrix},\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}$, 因此 -1 是一个特征值, 且它对应的特征向量为 $k_1(1,0,-1)^{\mathrm{T}},k_1\neq 0$; 1 是一个特征值, 它所对应的特征向

量为 $k_2(1,0,1)^{\mathrm{T}}, k_2 \neq 0$. 再由 $r(\boldsymbol{A})=2$ 知 0 也是 $\boldsymbol{A}$ 的特征值, 设它的特征向量为 $(x_1,x_2,x_3)^{\mathrm{T}}$,那么由对称矩阵不同特征值对应的特征向量的正交性得 $\begin{cases} x_1+x_3=0 \\ -x_1+x_3=0 \end{cases}$, 解得特征值 0 对应的特征向量为 $k_3(0,1,0)^{\mathrm{T}}, k_3 \neq 0$.

(2) 令 $\boldsymbol{\Lambda}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{\Lambda}$, 因此

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{P}^{-1} &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

22.(**本题满分 11 分**)

设随机变量 X 与 Y 的概率分布分别为

X	0	1
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$

Y	-1	0	1
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

且 $P(X^2=Y^2)=1$.

(1) 求二维随机变量 (X,Y) 的概率分布;

(2) 求 $Z=XY$ 的概率分布;

(3) 求 X 与 Y 的相关系数 ρ_{XY}.

解 (1) 由于 $P(X^2=Y^2)=1$, 所以 $P(X^2 \neq Y^2)=0$, 即 $P(X=0,Y=1)=P(X=0,Y=-1)=P(X=1,Y=0)=0$, 于是

$$P(X=1,Y=1)=P(Y=1)-P(X=0,Y=1)=P(Y=1)=\frac{1}{3},$$

$$P(X=1,Y=-1)=P(Y=-1)-P(X=0,Y=-1)=P(Y=-1)=\frac{1}{3},$$

$$P(X=0,Y=0)=P(Y=0)-P(X=1,Y=0)=P(Y=0)=\frac{1}{3}.$$

因此二维随机变量 (X,Y) 的概率分布为

X \ Y	-1	0	1
0	0	$\frac{1}{3}$	0
1	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$

(2) $Z=XY$ 的取值只有 $-1,0,1$, 且由 (X,Y) 的概率分布不难得到 Z 的概率分布为

Z	-1	0	1
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

(3) $E(X)=\frac{2}{3}, E(Y)=0, E(XY)=0, \mathrm{Cov}(X,Y)=E(XY)-E(X)E(Y)=0$, 因此 X 与 Y 的相关系数为 $\rho_{XY}=0$.

23.(**本题满分 11 分**)

设二维随机变量 (X,Y) 服从区域 G 上的均匀分布, 其中 G 是由 $x-y=0, x+y=2$ 与 $y=0$ 所围成的三角形区域.

(1) 求 X 的概率密度 $f_X(x)$;

(2) 求条件概率密度 $f_{X|Y}(x|y)$.

解 (1) (X,Y) 的概率密度为 $f(x,y)=\begin{cases}1, & (x,y)\in G\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$, 所以 X 的概率密度为

$$f_X(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\,\mathrm{d}y=\begin{cases}\int_0^x \mathrm{d}y, & 0\leqslant x\leqslant 1\\ \int_0^{2-x}\mathrm{d}y, & 1<x\leqslant 2\\ 0, & \text{其他}\end{cases}=\begin{cases}x, & 0\leqslant x\leqslant 1\\ 2-x, & 1<x\leqslant 2\\ 0, & \text{其他}\end{cases}.$$

(2) 因为 Y 的概率密度为

$$f_Y(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\,\mathrm{d}x=\begin{cases}\int_y^{2-y}\mathrm{d}x, & 0\leqslant y\leqslant 1\\ 0, \text{其他} & \end{cases}=\begin{cases}2(1-y), & 0\leqslant y\leqslant 1\\ 0, & \text{其他}\end{cases}.$$

所以在 $Y=y(0\leqslant y<1)$ 时, X 的条件概率密度为

$$f_{X|Y}(x|y)=\frac{f(x,y)}{f_Y(y)}=\begin{cases}\frac{1}{2-2y}, & y<x<2-y\\ 0, & \text{其他}\end{cases}.$$

7　2012 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 曲线 $y=\dfrac{x^2+x}{x^2-1}$ 的渐近线的条数为 (　)

A. 0　　B. 1　　C. 2　　D. 3

解　因为 $\lim\limits_{x\to\infty}\dfrac{x^2+x}{x^2-1}=1$, 所以直线 $y=1$ 是曲线 $y=\dfrac{x^2+x}{x^2-1}$ 的水平渐近线, 从而它没有斜渐近线. 又 $\lim\limits_{x\to 1}\dfrac{x^2+x}{x^2-1}=\infty$, 所以 $x=1$ 是一条垂直渐近线, 而 $x=-1$ 不是渐近线, 因此有两条渐近线, 选 C.

2. 设函数 $f(x)=(\mathrm{e}^x-1)(\mathrm{e}^{2x}-2)\cdots(\mathrm{e}^{nx}-n)$, 其中 n 为正整数, 则 $f'(0)=$ (　)

A. $(-1)^{n-1}(n-1)!$　　B. $(-1)^n(n-1)!$　　C. $(-1)^{n-1}n!$　　D. $(-1)^n n!$

解　利用导数的定义得

$$\begin{aligned}f'(0)&=\lim_{x\to 0}\frac{f(x)-f(0)}{x}=\lim_{x\to 0}\frac{(\mathrm{e}^x-1)(\mathrm{e}^{2x}-2)\cdots(\mathrm{e}^{nx}-n)}{x}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{\mathrm{e}^x-1}{x}\cdot\lim_{x\to 0}\left[(\mathrm{e}^{2x}-2)\cdots(\mathrm{e}^{nx}-n)\right)=(-1)^{n-1}(n-1)!,\end{aligned}$$

选 A.

3. 设函数 $f(t)$ 连续, 则二次积分 $\displaystyle\int_0^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{d}\theta\int_{2\cos\theta}^{2}f(r^2)r\mathrm{d}r=$ (　)

A. $\displaystyle\int_0^2\mathrm{d}x\int_{\sqrt{2x-x^2}}^{\sqrt{4-x^2}}\sqrt{x^2+y^2}f\left(x^2+y^2\right)\mathrm{d}y$

B. $\displaystyle\int_0^2\mathrm{d}x\int_{\sqrt{2x-x^2}}^{\sqrt{4-x^2}}f\left(x^2+y^2\right)\mathrm{d}y$

C. $\displaystyle\int_0^2\mathrm{d}x\int_{1+\sqrt{2x-x^2}}^{\sqrt{4-x^2}}\sqrt{x^2+y^2}f\left(x^2+y^2\right)\mathrm{d}y$

D. $\displaystyle\int_0^2\mathrm{d}x\int_{1+\sqrt{2x-x^2}}^{\sqrt{4-x^2}}f\left(x^2+y^2\right)\mathrm{d}y$

解　积分区域为 $\{(r,\theta)|2\cos\theta\leqslant r\leqslant 2, 0\leqslant\theta\leqslant\dfrac{\pi}{2}\}$, 化为直角坐标即 $\{(x,y)|2x\leqslant x^2+y^2\leqslant 4, x\geqslant 0, y\geqslant 0\}$, 此时先对 y 后对 x 的累次积分为 $\displaystyle\int_0^2\mathrm{d}x\int_{\sqrt{2x-x^2}}^{\sqrt{4-x^2}}f\left(x^2+y^2\right)\mathrm{d}y$,

选 B.

4. 已知级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(-1)^n\sqrt{n}\sin\dfrac{1}{n^\alpha}$ 绝对收敛, 级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^n}{n^{2-\alpha}}$ 条件收敛, 则 ( )

A. $0<\alpha\leqslant\dfrac{1}{2}$ B. $\dfrac{1}{2}<\alpha\leqslant 1$ C. $1<\alpha\leqslant\dfrac{3}{2}$ D. $\dfrac{3}{2}<\alpha<2$

解 由 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(-1)^n\sqrt{n}\sin\dfrac{1}{n^\alpha}$ 绝对收敛可得 $\alpha>\dfrac{3}{2}$, 再由 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{(-1)^n}{n^{2-\alpha}}$ 条件收敛可知 $1\leqslant\alpha<2$, 因此 $\dfrac{3}{2}<\alpha<2$, 选 D.

5. 设 $\boldsymbol{\alpha}_1\begin{pmatrix}0\\0\\c_1\end{pmatrix},\boldsymbol{\alpha}_2=\begin{pmatrix}0\\1\\c_2\end{pmatrix},\boldsymbol{\alpha}_3=\begin{pmatrix}1\\-1\\c_3\end{pmatrix},\boldsymbol{\alpha}_4=\begin{pmatrix}-1\\1\\c_4\end{pmatrix}$, 其中 c_1,c_2,c_3,c_4 为任意常数, 则下列向量线性相关的为 ( )

A. $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ B. $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_4$ C. $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ D. $\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$

解 显然可得 $|\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4|=\begin{vmatrix}0&1&-1\\0&-1&1\\c_1&c_2&c_3\end{vmatrix}=0$, 所以 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 一定线性相关, 选 C.

6. 设 $\boldsymbol{A}$ 为 3 阶矩阵, $\boldsymbol{P}$ 为 3 阶可逆矩阵, 且 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}$. 若 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$, $\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$, 则 $\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}=$ ( )

A. $\begin{pmatrix}1&0&0\\0&2&0\\0&0&1\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix}2&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}2&0&0\\0&2&0\\0&0&1\end{pmatrix}$

解 由初等变换与初等矩阵的关系可知 $\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$, 因此

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{Q}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}&=\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}^{-1}\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\\
&=\begin{pmatrix}1&0&0\\-1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\1&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&2\end{pmatrix},
\end{aligned}
$$

选 B.

7. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且都服从区间 $(0,1)$ 上的均匀分布, 则 $P(X^2+Y^2\leqslant$

1) = ( )

A. $\dfrac{1}{4}$　　B. $\dfrac{1}{2}$　　C. $\dfrac{\pi}{8}$　　D. $\dfrac{\pi}{4}$

解 X,Y 的联合概率密度为 $f(x,y)=\begin{cases}1, & 0<x<1, 0<y<1\\ 0, & 其他\end{cases}$, 设区域 $D=\{(x,y)|x^2+y^2\leqslant 1, 0<x<1, 0<y<1\}$, 于是 $P(X^2+Y^2<1)=\iint\limits_D f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\dfrac{\pi}{4}$, 选 D.

8. 设 X_1,X_2,X_3,X_4 为来自总体 $N(1,\sigma^2)(\sigma>0)$ 的简单随机样本, 则统计量 $\dfrac{X_1-X_2}{|X_3+X_4-2|}$ 的分布为 ( )

A. $N(0,1)$　　B. $t(1)$　　C. $\chi^2(1)$　　D. $F(1,1)$

解 由条件得 $X_1-X_2\sim N(0,2\sigma^2)$, $X_3+X_4-2\sim N(0,2\sigma^2)$, 于是 $\dfrac{X_1-X_2}{\sqrt{2}\sigma}$ 与 $\dfrac{X_3+X_4-2}{\sqrt{2}\sigma}$ 都服从标准正态分布, 且相互独立, 因此 $\dfrac{\frac{X_1-X_2}{\sqrt{2}\sigma}}{\sqrt{\left(\frac{X_3+X_4-2}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}}=\dfrac{X_1-X_2}{|X_3+X_4-2|}\sim t(1)$, 选 B.

二　填空题, 9 ∼ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. $\lim\limits_{x\to\frac{\pi}{4}}(\tan x)^{\frac{1}{\cos x-\sin x}}=$________.

解 先取对数用洛必达法则得

$$\lim_{x\to\frac{\pi}{4}}\frac{\ln(\tan x)}{\cos x-\sin x}=\lim_{x\to\frac{\pi}{4}}\frac{\sec^2 x}{(-\sin x-\cos x)\tan x}=-\sqrt{2},$$

因此原极限为 $\mathrm{e}^{-\sqrt{2}}$.

10. 设函数 $f(x)=\begin{cases}\ln\sqrt{x}, & x\geqslant 1\\ 2x-1, & x<1\end{cases}$, $y=f\big(f(x)\big)$, 则 $\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mathrm{e}}$________.

解 首先有

$$y=f(f(x))=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\ln f(x), & f(x)\geqslant 1\\ 2f(x)-1, & f(x)<1\end{cases}=\begin{cases}\dfrac{1}{2}\ln\left(\dfrac{1}{2}\ln x\right), & x\geqslant \mathrm{e}^2\\ \ln x-1, & 1\leqslant x<\mathrm{e}^2\\ 2(2x-1), & x<1\end{cases},$$

因此 $\left.\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mathrm{e}}=(\ln x-1)'\big|_{x=\mathrm{e}}=\dfrac{1}{\mathrm{e}}$.

11.设连续函数 $z=f(x,y)$ 满足 $\lim\limits_{\substack{x\to 0\\ y\to 0}}\dfrac{f(x,y)-2x+y-2}{\sqrt{x^2+(y-1)^2}}=0$, 则 $\mathrm{d}z\big|_{(0,1)}=$________.

解 由题意知当 $x\to 0, y\to 1$ 时, $f(x,y)=2x-y+2+o\left(\sqrt{x^2+(y-1)^2}\right)$, 由此可得 $\left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_{(0,1)}=2$, $\left.\dfrac{\partial z}{\partial y}\right|_{(0,1)}=-1$, 故 $\mathrm{d}z\big|_{(0,1)}=2\mathrm{d}x-\mathrm{d}y$.

12.由曲线 $y=\dfrac{4}{x}$ 和直线 $y=x$ 及 $y=4x$ 在第一象限中围成的平面图形的面积为________.

解 利用定积分可求得此平面图形的面积为 $S=\displaystyle\int_0^1(4x-x)\,\mathrm{d}x+\int_1^2\left(\frac{4}{x}-x\right)\mathrm{d}x=4\ln 2$.

13.设 $\boldsymbol{\alpha}$ 为 3 为单位列向量, $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵, 则矩阵 $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 的秩为________.

解 $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 是秩为 1 的实对称矩阵, 故它可以对角化, 且它的特征值为 $\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha},0,0$, 即 $1,0,0$. 则 $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 也可以对角化, 且它的特征值为 $0,1,1$, 因此 $r(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}})=2$.

14.设 A,B,C 是随机事件, A 与 C 互不相容, $P(AB)=\dfrac{1}{2}$, $P(C)=\dfrac{1}{3}$, 则 $P(AB|\bar{C})=$________.

解 由 A 与 C 互不相容可知 $P(AC)=P(ABC)=0$, 于是

$$P(AB|\bar{C})=\frac{P(AB\bar{C})}{P(\bar{C})}=\frac{P(AB)-P(ABC)}{1-P(C)}=\frac{1/2}{1-1/3}=\frac{3}{4}.$$

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\mathrm{e}^{x^2}-\mathrm{e}^{2-2\cos x}}{x^4}$.

解

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{\mathrm{e}^{x^2}-\mathrm{e}^{2-2\cos x}}{x^4}&=\lim_{x\to 0}\mathrm{e}^{2-2\cos x}\frac{\mathrm{e}^{x^2-2+2\cos x}-1}{x^4}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{x^2-2+2\cos x}{x^4}=\lim_{x\to 0}\frac{2x-2\sin x}{4x^3}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{\frac{1}{6}x^3}{2x^3}=\frac{1}{12}.\end{aligned}$$

16.(本题满分 10 分)

计算二重积分 $\displaystyle\iint_D \mathrm{e}^x xy\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, 其中 D 是以曲线 $y=\sqrt{x}$, $y=\dfrac{1}{\sqrt{x}}$ 及 y 轴为边界的无界区域.

解 积分区域可以写为 $D=\{(x,y)|0<x<1,\sqrt{x}<y<\frac{1}{\sqrt{x}}\}$, 则

$$\iint_D \mathrm{e}^x xy\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\int_0^1 x\mathrm{e}^x\mathrm{d}x\int_{\sqrt{x}}^{\frac{1}{\sqrt{x}}} y\mathrm{d}y=\int_0^1 x\mathrm{e}^x\frac{1}{2}\left(\frac{1}{x}-x\right)\mathrm{d}x$$

$$=-\frac{1}{2}\mathrm{e}^x(x-1)^2\Big|_0^1=\frac{1}{2}.$$

17.(本题满分 10 分)

某企业为生产甲、乙两种型号的产品投入的固定成本为 10000(万元). 设该企业生产甲、乙两种产品的产量分别为 x(件) 和 y(件), 且这两种产品的边际成本分别为 $20+\frac{x}{2}$(万元/件) 与 $6+y$(万元/件).

(1) 求生产甲、乙两种产品的总成本函数 $C(x,y)$(万元);

(2) 当总产量为 50 件时, 甲、乙两种产品的产量各位多少时可使总成本最小? 求最小总成本;

(3) 求总产量为 50 件时且总成本最小时甲的边际成本, 并解释其经济意义.

解 (1) 由题意知 $C_x'(x,y)=20+\frac{x}{2}$, 对 x 积分得 $C(x,y)=20x+\frac{x^2}{4}+\varphi(y)$, 再对 y 求导得 $C_y'(x,y)=\varphi'(y)=6+y$, 于是对 y 积分得 $\varphi(y)=6y+\frac{y^2}{2}+C$, 所以 $C(x,y)=20x+\frac{x^2}{4}+6y+\frac{y^2}{2}+C$. 又 $C(0,0)=10000$, 所以 $C=10000$, $C(x,y)=20x+\frac{x^2}{4}+6y+\frac{y^2}{2}+10000$.

(2) 若 $x+y=50$, 则 $y=50-x(0\leqslant x\leqslant 50)$, 代入到成本函数中得

$$C(x)=20x+\frac{x^2}{4}+6(50-x)+\frac{1}{2}(50-x)^2+10000=\frac{3}{4}x^2-36x+11550.$$

令 $C'(x)=\frac{3}{2}x-36=0$ 得 $x=24$, 不难得知这就是 $C(x)$ 的最小值点. 此时 $y=26$, 最小成本为 $C(24,26)=11118$.

(3) 求总产量为 50 件时且总成本最小时甲的边际成本为 $C_x'(24,26)=32$, 其经济意义为在要求总产量为 50 件条件下, 当甲产品为 24 件时, 若甲产品的产量再增加一件, 则总成本将增加 32 万元.

18.(本题满分 10 分)

证明: $x\ln\frac{1+x}{1-x}+\cos x\geqslant 1+\frac{x^2}{2}(-1<x<1)$.

证 注意到 $f(x)$ 是偶函数, 因此只需要证明 $f'(x)\geqslant 0, x\in[0,1)$ 即可. 首先有 $f'(x)=\ln\frac{1+x}{1-x}+\frac{2x}{1-x^2}-\sin x-x, x\in(0,1)$, 且 $\ln\frac{1+x}{1-x}>0$, $\frac{2x}{1-x^2}>2x>x+\sin x$, 因此 $f'(x)>0, x\in(0,1)$. 而 $f(0)=0$, 则有 $f(x)\geqslant 0, x\in[0,1)$, 证毕.

19.(本题满分 10 分)

已知函数 $f(x)$ 满足方程 $f''(x)+f'(x)-2f(x)=0$ 及 $f''(x)+f(x)=2\mathrm{e}^x$.

(1) 求 $f(x)$ 的表达式;

(2) 求曲线 $y=f(x^2)\int_0^x f(-t^2)\mathrm{d}t$ 的拐点.

解 (1) 微分方程 $f''(x)+f'(x)-2f(x)=0$ 的特征方程为 $\lambda^2+\lambda-2=0$, 特征根为 $\lambda_1=1,\lambda_2=-2$, 故方程的通解为 $f(x)=C_1\mathrm{e}^x+C_2\mathrm{e}^{-2x}$. 将 $f(x)=C_1\mathrm{e}^x+C_2\mathrm{e}^{-2x}$, $f''(x)=C_1\mathrm{e}^x+4C_2\mathrm{e}^{-2x}$ 代入方程 $f''(x)+f(x)=2\mathrm{e}^x$ 得 $2C_1\mathrm{e}^x+5C_2\mathrm{e}^{-2x}=2\mathrm{e}^x$, 所以 $C_1=1,C_2=0$, 故 $f(x)=\mathrm{e}^x$.

(2) 由 (1) 得到曲线 $y=f(x^2)\int_0^x f(-t^2)\,\mathrm{d}t=\mathrm{e}^{x^2}\int_0^x \mathrm{e}^{-t^2}\,\mathrm{d}t$, 分别求一阶导数与二阶导数得

$$y'=2x\mathrm{e}^{x^2}\int_0^x \mathrm{e}^{-t^2}\,\mathrm{d}t+1,\quad y''=2\mathrm{e}^{x^2}\left(1+2x^2\right)\int_0^x \mathrm{e}^{-t^2}\,\mathrm{d}t+2x,$$

令 $y''=0$ 得 $x=0,y=0$. 当 $x>0$ 时, $y''>0$; 当 $x<0$ 时, $y''<0$, 因此点 $(0,0)$ 就是曲线 $y=f(x)$ 的拐点.

20.(本题满分 11 分)

设 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&a&0&0\\0&1&a&0\\0&0&1&a\\a&0&0&1\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{\beta}=\begin{pmatrix}1\\-1\\0\\0\end{pmatrix}$.

(1) 计算行列式 $|\boldsymbol{A}|$;

(2) 当实数 a 为何值时, 方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{\beta}$ 有无穷多解, 并求其通解.

解 (1) 因为 $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})=2$, 对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 作初等行变换得

$$A=\begin{pmatrix}1&0&1\\0&1&1\\-1&0&a\\0&a&-1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&1\\0&1&1\\0&0&a+1\\0&0&-a-1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&1\\0&1&1\\0&0&a+1\\0&0&0\end{pmatrix},$$

所以 $a=-1$.

(2) 由 $a=-1$ 可得 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}2&0&2\\0&2&2\\2&2&4\end{pmatrix}$, 故矩阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的特征多项式为

$$|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}\lambda-2&0&2\\0&\lambda-2&-2\\-2&-2&\lambda-4\end{vmatrix}=\lambda(\lambda-2)(\lambda-6),$$

于是 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $\lambda_1=0,\lambda_2=2,\lambda_3=6$.

当 $\lambda_1=0$ 时, 解方程组 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得 λ_1 的单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_1=\dfrac{1}{\sqrt{3}}(1,1,-1)^{\mathrm{T}}$;

当 $\lambda_2=2$ 时, 解方程组 $(2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得 λ_2 的单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_2=\dfrac{1}{\sqrt{2}}(1,-1,0)^{\mathrm{T}}$;

当 $\lambda_3=6$ 时, 解方程组 $(6\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得 λ_3 的单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_3=\dfrac{1}{\sqrt{6}}(1,1,2)^{\mathrm{T}}$.

令 $\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3)$, 则在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 下, 原二次型化为标准形 $f=2y_2^2+6y_3^2$.

21.(本题满分 11 分)

已知 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}-1&0&1\\0&1&1\\-1&0&a\\0&a&-1\end{pmatrix}$, 二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}$ 的秩为 2.

(1) 求实数 a 的值;

(2) 求正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 将二次型 f 化为标准形.

解 (1) 行列式按照第一行展开得

$$|\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}1&a&0&0\\0&1&a&0\\0&0&1&a\\a&0&0&1\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}1&a&0\\0&1&a\\0&0&1\end{vmatrix}-a\begin{vmatrix}0&a&0\\0&1&a\\a&0&1\end{vmatrix}=1-a^4.$$

(2) 对增广矩阵 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\beta})$ 作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\beta})=\begin{pmatrix}1&a&0&0&1\\0&1&a&0&-1\\0&0&1&a&0\\a&0&0&1&0\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&a&0&0&1\\0&1&a&0&-1\\0&0&1&a&0\\0&-a^2&0&1&-a\end{pmatrix}$$
$$\to\begin{pmatrix}1&a&0&0&1\\0&1&a&0&-1\\0&0&1&a&0\\0&0&a^3&1&-a-a^3\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&a&0&0&1\\0&1&a&0&-1\\0&0&1&a&0\\0&0&0&1-a^4&-a-a^2\end{pmatrix}.$$

由于方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 有无穷多解当且仅当 $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\beta})<4$, 因此 $1-a^4=-a-a^2=0$, 解得 $a=-1$, 此时方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\beta}$ 有无穷多解, 且容易得到方程组的通解为 $\boldsymbol{x}=(0,-1,0,0)^{\mathrm{T}}+k(1,1,1,1)^{\mathrm{T}}$, 其中 k 为任意常数.

22.(本题满分 11 分)

设二维离散型随机变量 (X,Y) 的概率分布为

X \ Y	0	1	2
0	$\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{4}$
1	0	$\frac{1}{3}$	0
2	$\frac{1}{12}$	0	$\frac{1}{12}$

(1) 求 $P(X=2Y)$

(2) 求 $\mathrm{Cov}(X-Y,Y)$.

解 (1) 由 (X,Y) 的概率分布知 $P(X=2Y)=P(X=0,Y=0)+P(X=2,Y=1)=\frac{1}{4}$.

(2) 由 (X,Y) 的概率分布知 X,Y,XY 的概率分布分别为

$$X\sim\begin{pmatrix}0&1&2\\ \frac{1}{2}&\frac{1}{3}&\frac{1}{6}\end{pmatrix},Y\sim\begin{pmatrix}0&1&2\\ \frac{1}{3}&\frac{1}{3}&\frac{1}{3}\end{pmatrix},XY\sim\begin{pmatrix}0&1&4\\ \frac{7}{12}&\frac{1}{3}&\frac{1}{12}\end{pmatrix}.$$

所以 $E(X)=\frac{2}{3},E(Y)=1,E(Y^2)=\frac{5}{3},D(Y)=\frac{2}{3},E(XY)=\frac{2}{3}$, 于是 $\mathrm{Cov}(X,Y)=E(XY)-E(X)E(Y)=0,\mathrm{Cov}(X-Y)=\mathrm{Cov}(X,Y)-D(Y)=-\frac{2}{3}$.

23.(本题满分 11 分)

设随机变量 X 与 Y 相互独立,且都服从参数为 1 的指数分布,记 $U=\max\{X,Y\},V=\min\{X,Y\}$.

(1) 求 V 的概率密度 $f_V(v)$;

(2) 求 $E(U+V)$.

解 (1) X,Y 的分布函数均为 $F(x)=\begin{cases}1-\mathrm{e}^{-x}, & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases}$, 且 X,Y 相互独立, 于是 V 的分布函数为

$$\begin{aligned}F_V(v)&=P(V\leqslant v)=P(\min\{X,Y\}\leqslant v)=1-P(\min\{X,Y\}>v)\\&=1-P(X>v,Y>v)=1-P(X>v)P(Y>v)=1-[1-F(v)]^2\\&=\begin{cases}1-\mathrm{e}^{-2x}, & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases},\end{aligned}$$

因此 V 的概率密度为 $f_V(v)=F_V'(v)=\begin{cases}2\mathrm{e}^{-2x}, & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases}$.

(2) 由于 $U=\max\{X,Y\},V=\min\{X,Y\}$, 所以 $U+V=X+Y$, 则 $E(U+V)=E(X+Y)=E(X)+E(Y)=2$.

8　2013 年考研数学三

一　选择题, $1\sim 8$ 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 当 $x\to 0$ 时, 用 $o(x)$ 表示比 x 高阶的无穷小量, 则下列式子错误的是　(　)

   A. $x\cdot o(x^2)=o(x^3)$　　B. $o(x)\cdot o(x^2)=o(x^3)$

   C. $o(x^2)+o(x^2)=o(x^2)$　　D. $o(x)+o(x^2)=o(x^2)$

   解　容易判断 A, B, C 都是对的, 而 $o(x)+o(x^2)=o(x)$, 错误的选 D.

2. 函数 $f(x)=\dfrac{|x|^x-1}{x(x+1)\ln|x|}$ 的可去间断点的个数为　(　)

   A. 0　　B. 1　　C. 2　　D. 3

   解　由 $f(x)=\dfrac{|x|^x-1}{x(x+1)\ln|x|}$ 知 $f(x)$ 的间断点为 $x=0,\pm1$. 且

$$\lim_{x\to0}\frac{|x|^x-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to0}\frac{\mathrm{e}^{x\ln|x|}-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to0}\frac{x\ln|x|}{x(x+1)\ln|x|}=1,$$
$$\lim_{x\to1}\frac{|x|^x-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to1}\frac{\mathrm{e}^{x\ln|x|}-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to1}\frac{x\ln|x|}{x(x+1)\ln|x|}=\frac{1}{2},$$
$$\lim_{x\to-1}\frac{|x|^x-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to-1}\frac{\mathrm{e}^{x\ln|x|}-1}{x(x+1)\ln|x|}=\lim_{x\to-1}\frac{x\ln|x|}{x(x+1)\ln|x|}=\infty.$$

   因此 $f(x)$ 的可取间断点是 $x=0,1$, 选 C.

3. 设 D_k 是圆域 $D=\{(x,y)|x^2+y^2\leqslant 1\}$ 位于第 k 象限的部分, 记 $I_k=\displaystyle\iint_{D_k}(y-x)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\,(k=1,2,3,4)$, 则　(　)

   A. $I_1>0$　　B. $I_2>0$　　C. $I_3>0$　　D. $I_4>0$

   解　根据对称性可知 $I_1=I_3=0$, 而当 $x\in D_2$ 时, $y-x>0$, 因此 $I_2=\displaystyle\iint_{D_2}(y-x)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y>0$. 当 $x\in D_4$ 时, $y-x<0$, $I_4<0$, 选 B.

4. 设 $\{a_n\}$ 为正项数列, 下列选项正确的是　(　)

   A. 若 $a_n>a_{n+1}$, 则 $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}a_n$ 收敛

B. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}(-1)^{n-1}a_n$ 收敛, 则 $a_n > a_{n+1}$

C. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_n$ 收敛, 则存在常数 $p > 1$, 使 $\lim\limits_{n\to\infty} n^p a_n$ 存在

D. 若存在常数 $p > 1$, 是 $\lim\limits_{n\to\infty} n^p a_n$ 存在, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_n$ 收敛

解 A 选项中 a_n 不一定趋于 0, A 不对. B 选项可取反例 $a_n = \begin{cases} \dfrac{1}{n^3}, & n\text{为偶数} \\ \dfrac{1}{n^2}, & n\text{为奇数} \end{cases}$, B 不对. C 选项可取反例 $a_n = \dfrac{1}{n\ln^2 n}(n \geqslant 2)$, 则对任意 $p > 1$ 有 $\lim\limits_{n\to\infty} n^p a_n = \lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{n^{p-1}}{\ln^2 n} = +\infty$, C 不对. D 选项中存在正数 a, 使得 $\lim\limits_{n\to\infty} n^p a_n = a$, 那么当 $n\to\infty$ 时, a_n 为 $\dfrac{1}{n^p}$ 的同阶或高阶无穷小, 因此 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_n$ 收敛, 选 D.

5. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{C}$ 均为 n 阶矩阵, 若 $\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{C}$, 且 $\boldsymbol{B}$ 可逆, 则 ( )

A. 矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的行向量组与矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的行向量组等价

B. 矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的列向量组与矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的列向量组等价

C. 矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的行向量组与矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的行向量组等价

D. 矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的列向量组与矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的列向量组等价

解 对一个矩阵 $\boldsymbol{A}$ 右乘一个可逆矩阵 $\boldsymbol{B}$ 就是对 $\boldsymbol{A}$ 进行一系列的初等列变换后得到矩阵 $\boldsymbol{C}$, 因此矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的行向量组与矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的列向量组等价, 选 B.

6. 矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & a & 1 \\ a & b & a \\ 1 & a & 1 \end{pmatrix}$ 与 $\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 相似的充分必要条件为 ( )

A. $a=0, b=2$ B. $a=0$, b 为任意常数

C. $a=2, b=0$ D. $a=2$, b 为任意常数

解 两个同阶实对称矩阵相似的充要条件是它们具有相同的特征值, 矩阵 $\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 的特征值为 $2, b, 0$, 而 $|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}| = \begin{vmatrix} \lambda-1 & -a & -1 \\ -a & \lambda-b & -a \\ -1 & -a & \lambda-1 \end{vmatrix} = \lambda\left((\lambda-2)(\lambda-b)-2a^2\right)$, 因此当且仅当 $a=0$ 时, $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $2, b, 0$, 其中 b 可为任意常数, 选 B.

7. 设 X_1, X_2, X_3 是随机变量, 且 $X_1 \sim N(0,1), X_2 \sim N(0,2^2), X_3 \sim N(5,3^2), p_i = P(-2 \leqslant X_i \leqslant 2)(i=1,2,3)$, 则 ( )

A. $p_1 > p_2 > p_3$ B. $p_2 > p_1 > p_3$ C. $p_3 > p_1 > p_2$ D. $p_1 > p_3 > p_2$

解 利用正态分布的性质可得

$$p_1 = \Phi(2) - \Phi(-2) = 2\Phi(2) - 1,$$
$$p_2 = \Phi\left(\frac{2}{2}\right) - \Phi\left(\frac{-2}{2}\right) = 2\Phi(1) - 1,$$
$$p_3 = \Phi\left(\frac{2-5}{3}\right) - \Phi\left(\frac{-2-5}{3}\right) = \Phi(-1) - \Phi\left(-\frac{7}{3}\right).$$

利用标准正态分布的概率分布函数性质不难得到 $p_1 > p_2 > p_3$, 选 A.

8. 设随机变量 X 和 Y 相互独立, 且 X 和 Y 的概率分布分别为

X	0	1	2	3
P	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$

Y	-1	0	1
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$

则 $P(X + Y = 2) = 2$ ( )

A. $\frac{1}{12}$ B. $\frac{1}{8}$ C. $\frac{1}{6}$ D. $\frac{1}{2}$

解 利用 X, Y 的独立性得

$$\begin{aligned} P(X+Y=2) &= P(X=1, Y=1) + P(X=2, Y=0) + P(X=3, Y=-1) \\ &= P(X=1)P(Y=1) + P(X=2)P(Y=0) + P(X=3)P(Y=-1) = \frac{1}{6}, \end{aligned}$$

选 C.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设曲线 $y = f(x)$ 与 $y = x^2 - x$ 在点 $(1, 0)$ 处有公切线, 则 $\lim\limits_{n\to\infty} nf\left(\frac{n}{n+2}\right) =$________.

解 由曲线 $y = f(x)$ 与 $y = x^2 - x$ 在点 $(1, 0)$ 处有公切线知 $f(1) = 0$, $f'(1) = 1$, 则由导数定义得

$$\lim_{n\to\infty} nf\left(\frac{n}{n+2}\right) \xlongequal{x=\frac{n}{n+2}} \lim_{x\to1^-} \frac{2x}{1-x} f(x) = -2 \lim_{x\to1^-} \frac{f(x) - f(1)}{x-1} = -2f'(1) = -2.$$

10.设函数 $z = z(x, y)$ 由方程 $(z + y)^x = xy$ 确定, 则 $\left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_{(1,2)} =$________.

解 当 $x = 1, y = 2$ 时, $z = 2$. 方程 $(z + y)^x = xy$ 两边分别对 x 求偏导得

$$(z+y)^2\left(\ln(z+y) + \frac{x}{z+y}\frac{\partial z}{\partial x}\right) = y,$$

代入 $x = 1, y = 2, z = 0$ 可得 $\left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_{(1,2)} = 2 - 2\ln 2$.

11. $\int_1^{+\infty} \frac{\ln x}{(1+x)^2} \mathrm{d}x =$________.

解

$$\begin{aligned}\int_1^{+\infty} \frac{\ln x}{(1+x)^2} \mathrm{d}x &= -\int_1^{+\infty} \ln x \mathrm{d}\left(\frac{1}{1+x}\right) \\ &= -\left.\frac{\ln x}{1+x}\right|_1^{+\infty} + \int_1^{+\infty} \frac{\mathrm{d}x}{x(1+x)} \\ &= \left.\ln\left(\frac{x}{x+1}\right)\right|_1^{+\infty} = \ln 2.\end{aligned}$$

12. 微分方程 $y'' - y' + \frac{1}{4}y = 0$ 的通解为 $y =$________.

解 微分方程的特征方程为 $\lambda^2 - \lambda + \frac{1}{4} = 0$, 特征根为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{2}$, 则方程的通解为 $y = (C_1 + C_2 x)\mathrm{e}^{\frac{1}{2}x}, C_1, C_2 \in \mathbb{R}$.

13. 设 $\boldsymbol{A} = (a_{ij})$ 是 3 阶非零矩阵, $|\boldsymbol{A}|$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的行列式, A_{ij} 为 a_{ij} 的代数余子式, 若 $a_{ij} + A_{ij} = 0(i, j = 1, 2, 3)$, 则 $|\boldsymbol{A}| =$________.

解 由 $a_{ij} + A_{ij} = 0\,(i, j = 1, 2, 3)$ 可知 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} = -\boldsymbol{A}^*$, 于是 $|\boldsymbol{A}| = |\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}| = |-\boldsymbol{A}^*| = -|\boldsymbol{A}^*| = -|\boldsymbol{A}|^2$, 因此 $|\boldsymbol{A}| = 0$ 或 -1. 又 $\boldsymbol{A}$ 是非零矩阵, 不妨设 $a_{11} \neq 0$, 于是 $|\boldsymbol{A}| = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + a_{13}A_{13} = -(a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{13}^2) \neq 0$, 所以 $|\boldsymbol{A}| = -1$.

14. 设随机变量 X 服从正态分布 $N(0, 1)$, 则 $E\left(X\mathrm{e}^{2X}\right) =$________.

解

$$\begin{aligned}E\left(X\mathrm{e}^{2X}\right) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x\mathrm{e}^{2x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}} \mathrm{d}x \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(x-2)^2+2} \mathrm{d}x = \mathrm{e}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}(x-2)^2} \mathrm{d}x = 2\mathrm{e}^2.\end{aligned}$$

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

当 $x \to 0$ 时, $1 - \cos x \cdot \cos 2x \cdot \cos 3x$ 与 ax^n 为等价无穷小, 求 n 和 a 的值.

解 当 $x \to 0$ 时, 利用泰勒公式得

$$\begin{aligned}f(x) &= 1 - \cos x \cos 2x \cos 3x \\ &= 1 - \left(1 - \frac{x^2}{2} + o\left(x^2\right)\right)\left(1 - \frac{(2x)^2}{2} + o\left(x^2\right)\right)\left(1 - \frac{(3x)^2}{2} + o\left(x^2\right)\right) \\ &= 1 - \left(1 - \frac{1}{2}\left(1 + 2^2 + 3^2\right)x^2\right) + o\left(x^2\right) \sim 7x^2,\end{aligned}$$

因此 $a=7, n=2$

提示: 此题中有两点指的注意的地方, 一是泰勒公式展开的原则是要保留到最近低阶的非零无穷小, 这样能做到不漏也不多余. 二是此题不建议大家用洛必达法则, 因为在洛必达法则中 $\lim \frac{f(x)}{g(x)}=A$ 是 $\lim \frac{f'(x)}{g'(x)}=A$ 的必要非充分条件, 也就是说由 $\lim\limits_{x\to0} \frac{f(x)}{ax^n}=1$ 是不能直接得到 $\lim\limits_{x\to0} \frac{f'(x)}{nax^{n-1}}=1$ 的, 中间需要一些麻烦的说明, 因此用泰勒公式直截了当. 此题可以推广为 $\lim\limits_{x\to0} \frac{1-\prod_{k=1}^{n}(1-\cos a_k x)}{x^2}=\frac{1}{2}\sum\limits_{k=1}^{n} a_k^2$.

16.(本题满分 10 分)

设 D 是由曲线 $y=x^{\frac{1}{3}}$, 直线 $x=a(a>0)$ 及 x 轴所围成的平面图形, V_x, V_y 分别是 D 绕 x 轴, y 轴旋转一周所得旋转体的体积. 若 $V_y=10V_x$, 求 a 的值.

解 利用旋转体的体积公式得

$$V_x=\pi\int_0^a x^{\frac{2}{3}}\mathrm{d}x=\frac{3}{5}\pi a^{\frac{5}{3}}, V_y=2\pi\int_0^a x\cdot x^{\frac{1}{3}}\mathrm{d}x=\frac{6\pi}{7}a^{\frac{7}{3}}.$$

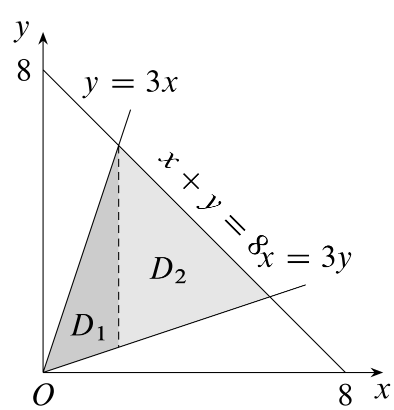
由 $V_y=10V_x$ 得 $\frac{6\pi}{7}a^{\frac{7}{3}}=10\times\frac{3}{5}\pi a^{\frac{5}{3}} \Rightarrow a=7\sqrt{7}$.

17.(本题满分 10 分)

设平面区域 D 由直线 $x=3y, y=3x$ 及 $x+y=8$ 围成, 计算 $\iint\limits_D x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y$.

解 积分区域可分为两部分

$$D_1=\left\{(x,y)\middle|0\leqslant x\leqslant 2, \frac{x}{3}\leqslant y\leqslant 3x\right\},$$
$$D_2=\left\{(x,y)\middle|2\leqslant x\leqslant 6, \frac{x}{3}\leqslant y\leqslant 8-x\right\}.$$



第 17 题图

则

$$
\begin{aligned}
\iint\limits_{D} x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y &= \iint\limits_{D_1} x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y + \iint\limits_{D_2} x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y \\
&= \int_0^2 x^2\mathrm{d}x \int_{\frac{x}{3}}^{3x} \mathrm{d}y + \int_2^6 x^2\mathrm{d}x \int_{\frac{x}{3}}^{8-x} \mathrm{d}y \\
&= \int_0^2 x^2\left(3x - \frac{x}{3}\right)\mathrm{d}x + \int_2^6 x^2\left(8 - x - \frac{x}{3}\right)\mathrm{d}x \\
&= \frac{416}{3}.
\end{aligned}
$$

18.(本题满分 10 分)

设生产某商品的固定成本为 60000 元, 可变成本为 20 元/件, 价格函数为 $p = 60 - \frac{Q}{1000}$(p 为单价, 单位: 元; Q 是销量, 单位: 件). 已知产销平衡, 求:

(1) 该商品的边际利润;

(2) 当 $p = 50$ 时的边际利润, 并解释其经济利益;

(3) 使得利润最大的定价 p.

解 (1) 商品的利润函数为 $L = pQ - (20Q + 60000) = 40Q - \frac{Q^2}{1000} - 60000$, 边际利润为 $\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}Q} = 40 - \frac{Q}{500}$.

(2) 当 $p = 50$ 时, 边际利润为 20, 其经济意义为当 $p = 50$ 时, 销售第 10001 件商品时所获得的利润为 20 元.

(3) 令 $\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}Q} = 40 - \frac{Q}{500} = 0$ 得 $Q = 20000$, 此时 $p = 60 - \frac{Q}{1000} = 40$, 显然这是使得二次函数取得最大值的点, 因此使得利润最大的定价 $p = 40$.

19.(本题满分 10 分)

奇函数 $f(x)$ 在 $[0, +\infty)$ 上可导, $f(0) = 0$, 且 $\lim\limits_{x\to+\infty} f(x) = 2$. 证明:

(1) 存在 $a > 0$, 使得 $f(a) = 1$;

(2) 对 (1) 中的 a, 存在 $\xi \in (0, a)$, 使得 $f'(\xi) = \frac{1}{a}$.

证 (1) 由 $\lim\limits_{x\to+\infty} f(x) = 2$ 可知存在 $X > 0$, 当 $x > X$ 时, $f(x) > 1$ 都成立. 即存在 $x_0 > 0$ 使得 $f(x_0) > 1$ 成立, 因此由连续函数介值定理知存在 $a \in [0, x_0]$ 使得 $f(a) = 1$.

(2) 由拉格朗日中值定理知存在 $\xi \in (0, a)$ 使得 $f'(\xi) = \frac{f(a) - f(0)}{a} = \frac{1}{a}$.

20.(本题满分 11 分)

设 $\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 1 & a \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & b \end{pmatrix}$, 当 a, b 为何值时, 存在矩阵 $\boldsymbol{C}$ 使得 $\boldsymbol{AC} - \boldsymbol{CA} = \boldsymbol{B}$, 并求所有矩阵 $\boldsymbol{C}$.

解 设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}x_1 & x_2\\ x_3 & x_4\end{pmatrix}$, 代入 $\boldsymbol{AC}-\boldsymbol{CA}=\boldsymbol{B}$ 得方程组

$$\begin{cases}-x_2+ax_3=0\\ -ax_1+x_2+ax_4=1\\ x_1-x_3-x_4=1\\ x_2-ax_3=b\end{cases}. \tag{$*$}$$

对该方程组的增广矩阵作初等行变换得

$$\begin{pmatrix}0 & -1 & a & 0 & 0\\ -a & 1 & 0 & a & 1\\ 1 & 0 & -1 & -1 & 1\\ 0 & 1 & -a & 0 & b\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1 & 0 & -1 & -1 & 1\\ 0 & 1 & -a & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & a+1\\ 0 & 0 & 0 & 0 & b\end{pmatrix}.$$

由此可知当 $a\neq -1$ 或 $b\neq 0$ 时, 方程组 $(*)$ 无解. 当 $a=-1$ 且 $b=0$ 时, 方程组 $(*)$ 有解, 且此时方程组的通解为 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,x_3,x_4)^{\mathrm{T}}=k_1(1,-1,1,0)^{\mathrm{T}}+k_2(1,0,0,1)^{\mathrm{T}}+(1,0,0,0)^{\mathrm{T}}$, 其中 k_1,k_2 为任意常数. 因此, 当且仅当 $a=-1,b=0$ 时存在矩阵 $\boldsymbol{C}=\begin{pmatrix}k_1+k_2+1 & -k_1\\ k_1 & k_2\end{pmatrix}$ $(k_1,k_2\in\mathbb{R})$ 使得 $\boldsymbol{AC}-\boldsymbol{CA}=\boldsymbol{B}$.

21.(本题满分 11 分)

设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=2(a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3)^2+(b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3)^2$, 记

$$\boldsymbol{\alpha}=\begin{pmatrix}a_1\\ a_2\\ a_3\end{pmatrix},\boldsymbol{\beta}=\begin{pmatrix}b_1\\ b_2\\ b_3\end{pmatrix}.$$

(1) 证明二次型 f 对应的矩阵为 $2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}$;

(2) 若 $\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta}$ 正交且均为单位向量, 证明 f 在正交变换下的标准形为 $2y_1^2+y_2^2$.

证 (1) 记 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,x_3)^{\mathrm{T}}$, 则 $a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3=(x_1,x_2,x_3)\begin{pmatrix}a_1\\ a_2\\ a_3\end{pmatrix}=(a_1,a_2,a_3)\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix}$.

因此

$$\begin{aligned}f(x_1,x_2,x_3)&=2(a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3)^2+(b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3)^2\\ &=2(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha})(\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x})+(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta})(\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x})=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{x}.\end{aligned}$$

且 $2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}$ 为对称矩阵, 所以二次型 f 对应的矩阵为 $\boldsymbol{A}=2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}$.

(2) 因为 $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}$ 正交且均为单位向量, 所以

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha} = (2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\alpha} = 2\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}) + \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}) = 2\boldsymbol{\alpha},$$
$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\beta} = (2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\beta} = 2\boldsymbol{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}) + \boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}) = \boldsymbol{\beta},$$

故 $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1$ 是矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值. 又 $\boldsymbol{A}$ 的秩 $r(\boldsymbol{A}) = r(2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}) \leqslant r(2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}})+r(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}) = 2$, 即 $\boldsymbol{A}$ 不是满秩矩阵, 所以 $\lambda_3 = 0$ 也是 $\boldsymbol{A}$ 的特征值, 故二次型 f 在正交变换下的标准形为 $2y_1^2 + y_2^2$.

22.(**本题满分 11 分**)

设 (X, Y) 是二维随机变量, X 的边缘概率密度为 $f_X(x) = \begin{cases} 3x^2, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 再给定 $X = x(0 < x < 1)$ 的条件下 Y 的条件概率密度为

$$f_{Y|X}(y|x) = \begin{cases} \dfrac{3y^2}{x^3}, & 0 < y < x \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

(1) 求 (X, Y) 的概率密度 $f(x, y)$;

(2) 求 Y 的边缘概率密度 $f_Y(y)$;

(3) 求 $P(X > 2Y)$.

解 (1) 由 X 的边缘分布知当 $x \leqslant 0$ 或 $x \geqslant 1$ 时, $f(x, y) = 0$. 当 $0 < x < 1$ 时,

$$f(x, y) = f_X(x) f_{Y|X}(y|x) = \begin{cases} \dfrac{9y^2}{x}, & 0 < y < x \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

因此求 (X, Y) 的概率密度 $f(x, y) = \begin{cases} \dfrac{9y^2}{x}, & 0 < y < x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$.

(2) Y 的边缘概率密度为

$$\begin{aligned} f_Y(y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y)\mathrm{d}x \\ &= \begin{cases} \displaystyle\int_y^1 \frac{9y^2}{x}\mathrm{d}x & 0 < y < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} -9y^2 \ln y, & 0 < y < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \end{aligned}$$

(3) $P(X > 2Y) = \displaystyle\iint\limits_{x>2Y} f(x, y)\mathrm{x}\mathrm{y} = \int_0^1 \mathrm{d}x \int_0^{\frac{x}{2}} \frac{9y^2}{x}\mathrm{d}y = \int_0^1 \frac{3}{8}x^2\mathrm{d}x = \frac{1}{8}$.

23.(本题满分 11 分)

设总体 X 的概率密度为 $f(x;\theta)=\begin{cases}\dfrac{\theta^2}{x^3}e^{-\frac{\theta}{x}}, & x>0\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$, 其中 θ 为未知参数且大于零, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为来自总体 X 的简单随机样本.

(1) 求 θ 的矩估计量;

(2) 求 θ 的最大似然估计量.

解 (1) 总体均值 $E(X)=\int_0^{+\infty}x\dfrac{\theta^2}{x^3}e^{-\frac{\theta}{x}}dx=\theta$, 令 $E(X)=\overline{X}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}X_i$, 因此 θ 的矩估计量为 $\hat{\theta}_1=\overline{X}$.

(2) 设 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为样本 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 的观测值, 则似然函数为

$$L(\theta)=\prod_{i=1}^{n}f(x_i;\theta)=\begin{cases}\dfrac{\theta^{2n}}{(x_1x_2\cdots x_n)^3}e^{-\theta\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}}, & x_1,x_2,\cdots,x_n>0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}.$$

当 $x_1,x_2,\cdots,x_n>0$ 时, $\ln L(\theta)=2n\ln\theta-\theta\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{1}{x_i}-3\sum\limits_{i=1}^{n}\ln x_i$, 令 $\dfrac{d[\ln L(\theta)]}{d\theta}=\dfrac{2n}{\theta}-\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{1}{x_i}=0$ 得 $\theta=\dfrac{2n}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}}$, 所以 θ 的最大似然估计量为 $\hat{\theta}_2=\dfrac{2n}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{X_i}}$.

9　2014 年考研数学三

一　选择题, 1 ~ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 设 $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = a$ 且 $a \neq 0$, 则当 n 充分大时有　　(　)

A. $|a_n| > \dfrac{|a|}{2}$　　B. $|a_n| < \dfrac{|a|}{2}$　　C. $a_n > a - \dfrac{1}{n}$　　D. $a_n < a + \dfrac{1}{n}$

解　由于 $\lim\limits_{n\to\infty} a_n = a, a \neq 0$, 那么对任意 $\varepsilon > 0$, 当 n 充分大时, 有

$$\big||a_n| - |a|\big| \leqslant |a_n - a| < \varepsilon,$$

即 $|a| - \varepsilon < |a_n| < |a| + \varepsilon$. 取 $\varepsilon = \dfrac{|a|}{2}$ 可知 A 正确而 B 错误, C 可取反例 $a_n = a - \dfrac{1}{n}$, D 可取反例 $a_n = a + \dfrac{1}{n}$, 选 A.

2. 下列曲线中有渐近线的是　　(　)

A. $y = x + \sin x$　　B. $y = x^2 + \sin x$　　C. $y = x + \sin\dfrac{1}{x}$　　D. $y = x^2 + \sin\dfrac{1}{x}$

解　可以用斜渐近线的定义直接判断 C 选项满足 $\lim\limits_{x\to\infty}(y - x) = \lim\limits_{x\to\infty}\sin\dfrac{1}{x} = 0$, 从而直线 $y = x$ 是曲线 $y = x + \sin\dfrac{1}{x}$ 的斜渐近线.

3. 设 $p(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$, 当 $x \to 0$ 时, 若 $p(x) - \tan x$ 是比 x^3 高阶的无穷小, 则下列选项中错误的是　　(　)

A. $a = 0$　　B. $b = 1$　　C. $c = 0$　　D. $d = \dfrac{1}{6}$

解　利用 $\tan x$ 的麦克劳林展开式知当 $x \to 0$ 时,$p(x) - \tan x = a + bx + cx^2 + dx^3 - x - \dfrac{x^3}{3} + o(x^3)$ 是比 x^3 高阶的无穷小, 因此 $a = 0, b = 1, c = 0, d = \dfrac{1}{3}$, 因此错误的选 D.

4. 设函数 $f(x)$ 具有二阶导数, $g(x) = f(0)(1 - x) + f(1)x$, 则在区间 $[0,1]$ 上　　(　)

A. 当 $f'(x) \geqslant 0$ 时, $f(x) \geqslant g(x)$　　B. 当 $f'(x) \geqslant 0$ 时, $f(x) \leqslant g(x)$

C. 当 $f''(x) \geqslant 0$ 时, $f(x) \geqslant g(x)$　　D. 当 $f''(x) \geqslant 0$ 时, $f(x) \leqslant g(x)$

解　令 $F(x) = f(x) - g(x) = f(x) - f(0)(1 - x) - f(1)x$, 则 $F(0) = F(1) = 0$, 且 $F''(x) = f''(x)$. 故当 $f''(x) > 0$ 时,$F(x)$ 为凹函数, 它的最大值在端点 $x = 0$ 或 $x = 1$ 处取到, 而 $F(0) = F(1) = 0$, 所以 $F(x) = f(x) - g(x) \leqslant 0$, 选 D.

5. 行列式 $\begin{vmatrix} 0 & a & b & 0 \\ a & 0 & 0 & b \\ 0 & c & d & 0 \\ c & 0 & 0 & d \end{vmatrix} =$ ( )

A. $(ad-bc)^2$　B. $-(ad-bc)^2$　C. $a^2d^2-b^2c^2$　D. $b^2c^2-a^2d^2$

解 利用行列式的基本性质, 分别交换一二列, 二三行和二三列可得

$$\begin{vmatrix} 0 & a & b & 0 \\ a & 0 & 0 & b \\ 0 & c & d & 0 \\ c & 0 & 0 & d \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} a & 0 & b & 0 \\ 0 & b & 0 & a \\ c & 0 & d & 0 \\ 0 & d & 0 & c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a & 0 & b & 0 \\ c & 0 & d & 0 \\ 0 & b & 0 & a \\ 0 & d & 0 & c \end{vmatrix}$$

$$= -\begin{vmatrix} a & b & 0 & 0 \\ c & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & a \\ 0 & 0 & d & c \end{vmatrix} = -(ad-bc)^2,$$

选 B.

6. 设 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\alpha}_3$ 为三维向量, 则对任意常数 k, l, 向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1 + k\boldsymbol{\alpha}_3, \boldsymbol{\alpha}_2 + k\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关是向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关的 ( )

A. 必要非充分条件　B. 充分非必要条件

C. 充分必要条件　D. 既非充分也非必要条件

解 如果 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关, 令 $\lambda_1(\boldsymbol{\alpha}_1 + k\boldsymbol{\alpha}_3) + \lambda_3(\boldsymbol{\alpha}_2 + l\boldsymbol{\alpha}_3) = \mathbf{0}$, 即

$$\lambda_1\boldsymbol{\alpha}_1 + \lambda_2\boldsymbol{\alpha}_2 + (k\lambda_1 + l\lambda_2)\boldsymbol{\alpha}_3 = \mathbf{0} \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 = k\lambda_1 + l\lambda_2 = 0,$$

从而 $\boldsymbol{\alpha}_1 + k\boldsymbol{\alpha}_3, \boldsymbol{\alpha}_2 + k\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关. 反之, 如果 $\boldsymbol{\alpha}_1 + k\boldsymbol{\alpha}_3, \boldsymbol{\alpha}_2 + k\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关, 不一定有 $\boldsymbol{\alpha}_1, \boldsymbol{\alpha}_2, \boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关. 如取反例 $\boldsymbol{\alpha}_1 = (1,0,0)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\alpha}_2 = (0,1,0)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\alpha}_3 = (0,0,0)^{\mathrm{T}}$, 因此选 A.

7. 设随机事件 A 与 B 相互独立, 且 $P(B) = 0.5, P(A-B) = 0.3$, 则 $P(B-A) =$ ( )

A. 0.1　B. 0.2　C. 0.3　D. 0.4

解 由 A, B 相互独立可得

$$\begin{aligned} P(A-B) &= P(A) - P(AB) = P(A) - P(A)P(B) \\ &= P(A) - 0.5P(A) = 0.5P(A) = 0.3, \end{aligned}$$

所以 $P(A) = 0.6$, $P(B-A) = P(B) - P(AB) = 0.5 - 0.5P(A) = 0.2$, 选 B.

8. 设 X_1, X_2, X_3 为来自正态总体 $N(0, \sigma^2)$ 的简单随机样本, 则统计量 $S = \dfrac{X_1 - X_2}{\sqrt{2}|X_3|}$ 服从的分布为 ( )

A. $N(0,1)$ B. $t(1)$ C. $\chi^2(1)$ D. $F(1,1)$

解 首先 $X_1-X_2\sim N(0,2\sigma^2)$, $X_3\sim N(0,\sigma^2)$, 因此 $\dfrac{X_1-X_2}{\sqrt{2}\sigma}\sim N(0,1)$, $\dfrac{X_3}{\sigma}\sim N(0,1)$, 则 $\dfrac{X_3^2}{\sigma^2}\sim\chi^2(1)$, 且 X_1-X_2 与 X_3 独立, 故 $\dfrac{(X_1-X_2)/(\sqrt{2}\sigma)}{\sqrt{X_3^2/\sigma^2}}=\dfrac{X_1-X_2}{\sqrt{2}|X_3|}\sim t(1)$, 选 C.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设某商品的需求函数为 $Q=40-2p$ (p 为商品的价格), 则该商品的边际收益为________.

解 由 $Q=40-2p$ 得 $p=\dfrac{40-Q}{2}$, 于是收益函数为 $R=pQ=\dfrac{(40-Q)Q}{2}$, 边际收益为 $\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}Q}=20-Q$.

提示: 边际收益的定义是收益对销售量 Q 的导数, 而不是对价格 p 的导数.

10. 设 D 是由曲线 $xy+1=0$ 与直线 $y+x=0$ 及 $y=2$ 围成的有界区域, 则 D 的面积为________.

解 画出积分区域图不难得到区域 D 的面积为 $S=\int_0^1\mathrm{d}y\int_{-y}^0\mathrm{d}x+\int_1^2\mathrm{d}y\int_{-\frac{1}{y}}^0\mathrm{d}x=\dfrac{1}{2}+\ln 2$.

11. 设 $\int_0^a x\mathrm{e}^{2x}\mathrm{d}x=\dfrac{1}{4}$, 则 $a=$________.

解 由条件得 $\int_0^a x\mathrm{e}^{2x}\mathrm{d}x=\left(\dfrac{x}{2}-\dfrac{1}{4}\right)\mathrm{e}^{2x}\Big|_0^a=\left(\dfrac{a}{2}-\dfrac{1}{4}\right)\mathrm{e}^{2a}+\dfrac{1}{4}=\dfrac{1}{4}$, 因此 $a=\dfrac{1}{2}$.

12. 二次积分 $\int_0^1\mathrm{d}y\int_y^1\left(\dfrac{\mathrm{e}^{x^2}}{x}-\mathrm{e}^{y^2}\right)\mathrm{d}x=$________.

解

$$\begin{aligned}
\int_0^1\mathrm{d}y\int_y^1\left(\frac{\mathrm{e}^{x^2}}{x}-\mathrm{e}^{y^2}\right)\mathrm{d}x&=\int_0^1\mathrm{d}y\int_y^1\frac{\mathrm{e}^{x^2}}{x}\mathrm{d}x-\int_0^1\mathrm{d}y\int_y^1\mathrm{e}^{y^2}\mathrm{d}x\\
&=\int_0^1\mathrm{d}x\int_0^x\frac{\mathrm{e}^{x^2}}{x}\mathrm{d}y-\int_0^1(1-y)\,\mathrm{e}^{y^2}\mathrm{d}y\\
&=\int_0^1\mathrm{e}^{x^2}\mathrm{d}x-\int_0^1(1-y)\,\mathrm{e}^{y^2}\mathrm{d}y=\int_0^1 y\mathrm{e}^{y^2}\mathrm{d}y\\
&=\frac{1}{2}\mathrm{e}^{y^2}\Big|_0^1=\frac{\mathrm{e}-1}{2}.
\end{aligned}$$

13. 设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=x_1^2-x_2^2+2ax_1x_3+4x_2x_3$ 的负惯性指数为 1, 则 a 的取值范围是________.

解 由配方法得

$$\begin{aligned} f(x_1,x_2,x_3) &= x_1^2+2ax_1x_3+a^2x_3^2-\left(x_2^2-4x_2x_3+4x_3^2\right)+4x_3^2-a^2x_3^2 \\ &= (x_1+ax_3)^2-(x_2-2x_3)^2+\left(4-a^2\right)x_3^2, \end{aligned}$$

因为负惯性指数为 1, 所以 $4-a^2 \geqslant 0$, 解得 $-2 \leqslant a \leqslant 2$.

14.设总体 X 的概率密度为

$$f(x;\theta)=\begin{cases} \dfrac{2x}{3\theta^2}, & \theta<x<2\theta \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

其中 θ 是未知参数, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为来自总体 X 的简单随机样本,若 $E\left(c\sum\limits_{i=1}^{n}X_i^2\right)=\theta^2$, 则 $c=$________.

解 由条件得

$$\begin{aligned} E\left(c\sum_{i=1}^{n}X_i^2\right) &= c\sum_{i=1}^{n}E\left(X_i^2\right)=cnE\left(X^2\right) \\ &= cn\int_{\theta}^{2\theta}\frac{2x^3}{3\theta^2}\mathrm{d}x=\frac{2cn}{3\theta^2}\cdot\frac{1}{4}x^4\Big|_{\theta}^{2\theta}=\frac{5cn}{2}\theta^2=\theta^2, \end{aligned}$$

因此 $c=\dfrac{2}{5n}$.

三　解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{\int_1^x\left[t^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{t}}-1\right)-t\right]\mathrm{d}t}{x^2\ln\left(1+\frac{1}{x}\right)}$.

解 当 $t>0$ 时,$t^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{t}}-1\right)-t>t^2\left(\dfrac{1}{t}+\dfrac{1}{2t^2}\right)-t=\dfrac{1}{2}$, 因此极限的分子是趋于正无穷的, 利用等价无穷小与洛必达法则可得

$$\begin{aligned} \lim_{x\to+\infty}\frac{\int_1^x\left[t^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{t}}-1\right)-t\right]\mathrm{d}t}{x^2\ln\left(1+\frac{1}{x}\right)} &= \lim_{x\to+\infty}\frac{\int_1^x\left[t^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{t}}-1\right)-t\right]\mathrm{d}t}{x^2\cdot\frac{1}{x}} \\ &= \lim_{x\to+\infty}\frac{\int_1^x\left[t^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{t}}-1\right)-t\right]\mathrm{d}t}{x} \\ &= \lim_{x\to+\infty}\left[x^2\left(\mathrm{e}^{\frac{1}{x}}-1\right)-x\right] \end{aligned}$$

$$= \lim_{x \to +\infty} \frac{e^{\frac{1}{x}} - 1 - \frac{1}{x}}{\frac{1}{x^2}}$$

$$= \lim_{x \to +\infty} \frac{1}{2x^2} \bigg/ \frac{1}{x^2} = \frac{1}{2}.$$

提示: 事实上, 洛必达法则适用于 $\frac{?}{\infty}$ 型的极限, 也就是只需要分母趋于无穷, 不需要验证分子是否趋于无穷, 就可以使用洛必达法则了.

16.(本题满分 10 分)

设平面区域 $D = \{(x, y) | 1 \leqslant x^2 + y^2 \leqslant 4, x \geqslant 0, y \geqslant 0\}$, 计算 $\iint\limits_D \frac{x \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right)}{x+y} dxdy$.

解 积分区域关于直线 $y = x$ 对称, 利用轮换对称性与极坐标可得

$$I = \iint\limits_D \frac{x \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right)}{x+y} dxdy = \iint\limits_D \frac{y \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right)}{x+y} dxdy$$

$$= \frac{1}{2}\left(\iint\limits_D \frac{x \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right)}{x+y} dxdy + \iint\limits_D \frac{y \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right)}{x+y} dxdy\right)$$

$$= \frac{1}{2}\iint\limits_D \sin\left(\pi\sqrt{x^2+y^2}\right) dxdy = \frac{1}{2}\int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \int_1^2 r\sin(\pi r)dr$$

$$= -\frac{3}{4}.$$

17.(本题满分 10 分)

设函数 $f(u)$ 具有二阶连续导数, $z = f(e^x \cos y)$ 满足 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = (4z + e^x \cos y) e^{2x}$, 若 $f(0) = 0, f'(0) = 0$, 求 $f(u)$ 的表达式.

解 利用多元复合函数偏导公式得

$$\frac{\partial z}{\partial x} = f'(e^x \cos y) e^x \cos y, \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = f''(e^x \cos y) e^{2x} \cos^2 y + f'(e^x \cos y) e^x \cos y,$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = -f'(e^x \cos y) e^x \sin y, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = f''(e^x \cos y) e^{2x} \sin^2 y - f'(e^x \cos y) e^x \cos y.$$

所以等式 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = (4z + e^x \cos y) e^{2x}$ 化为

$$f''(e^x \cos y) e^{2x} = [4f(e^x \cos y) + e^x \cos y] e^{2x},$$

因此函数 $f(u)$ 满足微分方程 $f''(u) = 4f(u) + u$, 此方程的通解为 $f(u) = C_1 e^{2u} + C_2 e^{-2u} - \frac{u}{4}$. 由 $f(0) = f'(0) = 0$ 得 $C_1 + C_2 = 0, 2C_1 - 2C_2 - \frac{1}{4} = 0$, 解得 $C_1 = \frac{1}{16}, C_2 = -\frac{1}{16}$, 故 $f(u) = \frac{1}{16}\left(e^{2u} - e^{-2u} - 4u\right)$.

18.(本题满分 10 分)

求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty}(n+1)(n+3)x^n$ 的收敛域及和函数.

解 令 $a_n=(n+1)(n+3)$, 因为 $\lim_{n\to\infty}\left|\frac{a_{n+1}}{a_n}\right|=1$, 所以幂级数的收敛半径为 $R=1$. 当 $x=\pm 1$ 时, $\sum_{n=0}^{\infty}(n+1)(n+3)x^n$ 发散, 因此幂级数的收敛域为 $(-1,1)$. 当 $x\in(-1,1)$ 时,

$$
\begin{aligned}
S(x)&=\sum_{n=0}^{\infty}(n+1)(n+3)x^n=\sum_{n=0}^{\infty}(n+2)(n+1)x^n+\sum_{n=0}^{\infty}(n+1)x^n\\
&=\left(\sum_{n=0}^{\infty}x^{n+2}\right)''+\left(\sum_{n=0}^{\infty}x^{n+1}\right)'=\left(\frac{x^2}{1-x}\right)''+\left(\frac{x}{1-x}\right)'\\
&=\left(\frac{1}{1-x}-1-x\right)''+\left(\frac{1}{1-x}-1\right)'\\
&=\frac{2}{(1-x)^3}+\frac{1}{(1-x)^2}=\frac{3-x}{(1-x)^3}.
\end{aligned}
$$

19.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x),g(x)$ 在区间 $[a,b]$ 上连续, 且 $f(x)$ 单调增加, $0\leqslant g(x)\leqslant 1$. 证明:

(1) $0\leqslant\int_a^x g(t)\,\mathrm{d}t\leqslant x-a, x\in[a,b]$;

(2) $\int_a^{a+\int_a^b g(t)\mathrm{d}t} f(x)\,\mathrm{d}x\leqslant\int_a^b f(x)g(x)\,\mathrm{d}x$.

解 (1) 因为 $\leqslant g(x)\leqslant 1$, 所以 $0\leqslant\int_a^x g(t)\mathrm{d}t\leqslant\int_a^x\mathrm{d}t=x-a, x\in[a,b]$.

(2) 令 $F(x)=\int_a^x f(t)g(t)\,\mathrm{d}t-\int_a^{a+\int_0^x g(u)\mathrm{d}u} f(t)\,\mathrm{d}t$, 则

$$F'(x)=f(x)g(x)-f\left(a+\int_a^x g(u)\,\mathrm{d}u\right)g(x)=\left[f(x)-a+\int_a^x g(u)\,\mathrm{d}u\right]g(x).$$

由 (1) 知 $a+\int_a^x g(t)\mathrm{d}t\leqslant a+x-a=x$, 而 $f(x)$ 单调增加, 所以 $F'(x)\geqslant 0$, 这说明 $F(x)$ 单调增加. 又 $F(a)=0$, 所以 $F(b)\geqslant 0$, 即 $\int_a^{a+\int_a^b g(t)\mathrm{d}t} f(x)\,\mathrm{d}x\leqslant\int_a^b f(x)g(x)\,\mathrm{d}x$.

20.(本题满分 11 分)

设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&-2&3&-4\\0&1&-1&1\\1&2&0&-3\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{E}$ 为三阶单位矩阵.

(1) 求方程 $\boldsymbol{Ax}=\mathbf{0}$ 的一个基础解系;

(2) 求满足 $\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{E}$ 的所有矩阵 $\boldsymbol{B}$.

解 (1) 对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 作初等行变换得 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&-2&3&-4\\0&1&-1&1\\1&2&0&-3\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&0&1\\0&1&0&-2\\0&0&1&-3\end{pmatrix}$, 则方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{0}$ 的一个基础解系为 $\boldsymbol{\alpha}=(-1,2,3,1)^{\mathrm{T}}$.

(2) 对矩阵 $(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{E})$ 作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{E})=\begin{pmatrix}1&-2&3&-4&1&0&0\\0&1&-1&1&0&1&0\\1&2&0&-3&0&0&1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&0&0&1&2&6&-1\\0&1&0&-2&-1&-3&1\\0&0&1&-3&-1&-4&1\end{pmatrix}.$$

记 $\boldsymbol{E}=(\boldsymbol{e}_1,\boldsymbol{e}_2,\boldsymbol{e}_3)$, 则 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{e}_1$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=(2,-1,-1,0)^{\mathrm{T}}+k_1\boldsymbol{\alpha},k_1\in\mathbb{R}$; $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{e}_2$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=(6,-3,-4,0)^{\mathrm{T}}+k_2\boldsymbol{\alpha}_2,k_2\in\mathbb{R}$; $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{e}_3$ 的通解为 $x=(-1,1,1,0)^{\mathrm{T}}+k_3\boldsymbol{\alpha},k_3\in\mathbb{R}$. 因此所求的矩阵为

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}2&6&-1\\-1&-3&1\\-1&-4&1\\0&0&0\end{pmatrix}+(k_1\boldsymbol{\alpha},k_2\boldsymbol{\alpha},k_3\boldsymbol{\alpha})=\begin{pmatrix}2-k_1&6-k_2&-1-k_3\\-1+2k_1&-3+2k_2&1+2k_3\\-1+3k_1&-4+3k_2&1+3k_3\\k_1&k_2&k_3\end{pmatrix},$$

其中 $k_1,k_2,k_3\in\mathbb{R}$.

21.(本题满分 11 分)

证明 n 阶矩阵 $\begin{pmatrix}1&1&\cdots&1\\1&1&\cdots&1\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\1&1&\cdots&1\end{pmatrix}$ 与 $\begin{pmatrix}0&\cdots&0&1\\0&\cdots&0&2\\\vdots&\iddots&\vdots&\vdots\\0&\cdots&0&n\end{pmatrix}$ 相似.

解 先证明一个基本结论:

引理

秩为 1 的矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可对角化的充要条件是 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})\neq 0$. 且当 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})\neq 0$ 时, $\boldsymbol{A}$ 的相似标准形为 $\mathrm{diag}\{\mathrm{tr}(\boldsymbol{A}),0,\cdots,0\}$.

证 由于 $r(\boldsymbol{A})=1$, 所以方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{0}$ 有且只有 $n-1$ 个线性无关的解, 因此 0 至少是 $\boldsymbol{A}$ 的 $n-1$ 重特征值, 且它只有 $n-1$ 个线性无关的特征向量. 特征值的和等于矩阵的迹, 因此 $\boldsymbol{A}$ 的最后一个特征值就是 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})$. 当 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})\neq 0$ 时, 此非零特征值有一个线性无关特征向量, 此时 $\boldsymbol{A}$ 可对角化, 且其相似标准形为 $\mathrm{diag}\{\mathrm{tr}(\boldsymbol{A}),0,\cdots,0\}$. 若 $\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})=0$, 则 0 是 $\boldsymbol{A}$ 的 n 重特征值, 但只有 $n-1$ 个线性无关特征向量, 此时不可对角化, 证毕.

由 $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{B})=1,\operatorname{tr}(\boldsymbol{A})=\operatorname{tr}(\boldsymbol{B})=n$ 可知 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 都相似于对角阵 $\operatorname{diag}\{n,0,\cdots,0\}$, 故 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相似.

22.(本题满分 11 分)

设随机变量 X 的概率分布为 $P(X=1)=P(X=2)=\dfrac{1}{2}$, 在给定 $X=i$ 的条件下, 随机变量 Y 服从均匀分布 $U(0,i)(i=1,2)$.

(1) 求 Y 的分布函数 $F_Y(y)$;

(2) 求 EY.

解 (1) 由分布函数定义得

$$\begin{aligned}
F_Y(y)&=P(Y\leqslant y)\\
&=P(X=1)P(Y\leqslant y|X=1)+P(X=2)P(Y\leqslant y|X=2)\\
&=\frac{1}{2}P(Y\leqslant y|X=1)+\frac{1}{2}P(Y\leqslant y|X=2)\\
&=\begin{cases}0, & y<0\\ \dfrac{1}{2}y+\dfrac{1}{2}\times\dfrac{1}{2}y, & 0\leqslant y<1\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\times\dfrac{1}{2}y, & 1\leqslant y<2\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2} & y\geqslant 2\end{cases}=\begin{cases}0 & y<0\\ \dfrac{3y}{4}, & 0\leqslant y<1\\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{y}{4}, & 1\leqslant y<2\\ 1, & y\geqslant 2\end{cases}.
\end{aligned}$$

(2) Y 的概率密度为 $f_Y(y)=\begin{cases}\dfrac{3}{4}, & 0<y<1\\ \dfrac{1}{4}, & 1\leqslant y<2\\ 0, & 其他\end{cases}$, 因此

$$E(Y)=\int_{-\infty}^{+\infty}yf_Y(y)\,\mathrm{d}y=\int_0^1\frac{3}{4}y\mathrm{d}y+\int_1^2\frac{1}{4}y\mathrm{d}y=\frac{3}{4}.$$

23.(本题满分 11 分)

设随机变量 X,Y 的概率分布相同, X 的概率分布为 $P(X=0)=\dfrac{1}{3}$, $P(X=1)=\dfrac{2}{3}$, 且 X 与 Y 的相关系数 $\rho_{XY}=\dfrac{1}{2}$.

(1) 求 (X,Y) 的概率分布;

(2) 求 $P(X+Y\leqslant 1)$.

解 (1) 由条件可得 $E(X)=E(Y)=\dfrac{2}{3}$, $D(X)=D(Y)=\dfrac{2}{3}\times\dfrac{1}{3}=\dfrac{2}{9}$, 且 $E(XY)=P(X=1,Y=1)$, 所以 $\rho_{XY}=\dfrac{\operatorname{Cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}=\dfrac{9}{2}\left(P(X=1,Y=1)-\dfrac{4}{9}\right)=\dfrac{1}{2}$, 于是 $P(X=1,Y=1)=\dfrac{5}{9}$. 由此以及 X,Y 的边缘分布即可得 (X,Y) 的概率分布为

$X \backslash Y$	0	1
0	$\frac{2}{9}$	$\frac{1}{9}$
1	$\frac{1}{9}$	$\frac{5}{9}$

(2) $P(X+Y \leqslant 1) = 1 - P(X+Y > 1) = 1 - \frac{5}{9} = \frac{4}{9}$.

10　2015 年考研数学三

一　选择题, 1 ∼ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 设 $\{x_n\}$ 是数列, 下列命题中不正确的是 (　)

A. 若 $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty} x_{2n} = \lim\limits_{n\to\infty} x_{2n+1} = a$

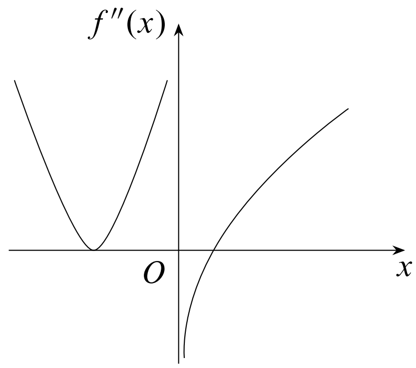
B. $\lim\limits_{n\to\infty} x_{2n} = \lim\limits_{n\to\infty} x_{2n+1} = a$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a$

C. $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty} x_{3n} = \lim\limits_{n\to\infty} x_{3n+1} = a$

D. 若 $\lim\limits_{n\to\infty} x_{3n} = \lim\limits_{n\to\infty} x_{3n+1} = a$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a$

解　一个数列收敛的充要条件是它的任意子列都收敛于同一个极限, 因此 A 和 C 都对. 对于选项 B, 子列 $\{x_{2n}\}$ 和 $\{x_{2n+1}\}$ 刚好是 $\{x_n\}$ 奇数子列和偶数子列, 这两个子列收敛于同一个极限, 也能说明 $\{x_n\}$ 收敛. 但是 D 选项中少了子列 $\{x_{3n+2}\}$ 的收敛性, 得不到 $\{x_n\}$ 收敛, 错误的选 D.

2. 设函数 $f(x)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 内连续, 其二阶导函数 $f''(x)$ 的图像如图所示, 则曲线 $y = f(x)$ 的拐点个数为 (　)



第 2 题图

A. 0　　B. 1　　C. 2　　D. 3

解　拐点是连续曲线凹凸性发生变化的点, 这里就是二阶导数符号发生变化的点. 从图中可知 $f''(x)$ 的符号发生变化的点是原点和 $y = f''(x)$ 在 $x > 0$ 时与 x 轴的交

点, $x<0$ 时的交点不是拐点, 因此有两个拐点, 选 C.

3. 设 $D=\{(x,y)|x^2+y^2\leqslant 2, x^2+y^2\leqslant 2y\}$, 函数 $f(x,y)$ 在 D 上连续, 则 $\iint\limits_D f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=$ ( )

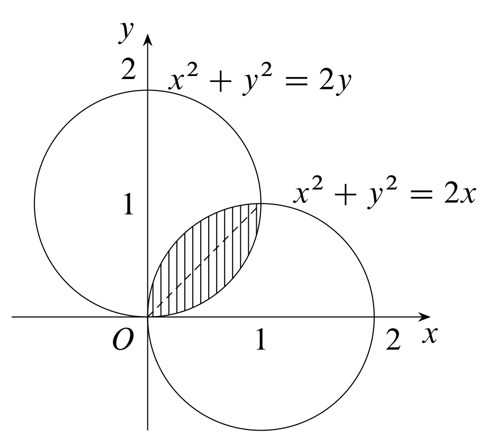
A. $\int_0^{\frac{\pi}{4}}\mathrm{d}\theta\int_0^{2\cos\theta} f(r\cos\theta, r\sin\theta)r\mathrm{d}r+\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{d}\theta\int_0^{2\sin\theta} f(r\cos\theta, r\sin\theta)r\mathrm{d}r$

B. $\int_0^{\frac{\pi}{4}}\mathrm{d}\theta\int_0^{2\sin\theta} f(r\cos\theta, r\sin\theta)r\mathrm{d}r+\int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{d}\theta\int_0^{2\cos\theta} f(r\cos\theta, r\sin\theta)r\mathrm{d}r$

C. $2\int_0^1\mathrm{d}x\int_{1-\sqrt{1-x^2}}^{x} f(x,y)\mathrm{d}y$

D. $2\int_0^1\mathrm{d}x\int_{x}^{\sqrt{2x-x^2}} f(x,y)\mathrm{d}y$

解 积分区域如图. 如果化为直角坐标系下 X 型区域的累次积分, 积分区域可表示为



第 3 题图

$$0\leqslant x\leqslant 1, 1-\sqrt{1-x^2}\leqslant y\leqslant\sqrt{2x-x^2},$$

那么累次积分为 $\int_0^1\mathrm{d}x\int_{1-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{2x-x^2}} f(x,y)\mathrm{d}y$, 但是 $f(x,y)$ 在区域的上下部分的积分不一定相等, 所以不能写成其中一半区域积分的两倍, C 和 D 都是不对的. 如果化为极坐标, 代入 $x=r\cos\theta, y=r\sin\theta$ 可知上下两个圆的方程分别为 $r=2\sin\theta, r=2\cos\theta$, 因此正确答案选 B.

4. 下列级数中发散的是 ( )

A. $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\frac{n}{3^n}$　　B. $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{n}}\ln\left(1+\frac{1}{n}\right)$

C. $\sum\limits_{n=2}^{\infty}\frac{(-1)^n+1}{\ln n}$　　D. $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\frac{n!}{n^n}$

解 A 选项由比值法有 $\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{(n+1)/3^{n+1}}{n/3^n}=\dfrac{1}{3}$, 故 A 选项收敛, B 选项中 $\dfrac{1}{\sqrt{n}}\ln\left(1+\dfrac{1}{n}\right)\sim\dfrac{1}{n^{\frac{3}{2}}}$, 也收敛, C 选项中 $\sum\limits_{n=2}^{\infty}\dfrac{(-1)^n+1}{\ln n}=\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{2}{\ln(2n)}$ 是发散的, D 选项由比值法有

$$\lim_{n\to\infty}\frac{(n+1)!/(n+1)^{n+1}}{n!/n^n}=\lim_{n\to\infty}\frac{n^n}{(n+1)^n}=\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\left(1+\frac{1}{n}\right)^n}=\frac{1}{\mathrm{e}}<1,$$

所以 D 选项也收敛, 选 C.

5. 设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&2&a\\1&4&a^2\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{b}=\begin{pmatrix}1\\d\\d^2\end{pmatrix}$, 若集合 $\Omega=\{1,2\}$, 则线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}$ 有无穷多解的充分必要条件为 (　)

A. $a\notin\Omega, d\notin\Omega$　　B. $a\notin\Omega, d\in\Omega$　　C. $a\in\Omega, d\notin\Omega$　　D. $a\in\Omega, d\in\Omega$

解 方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}$ 有无穷多解 $\Leftrightarrow r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{A}\ \boldsymbol{b})<3$, 利用初等行变换得

$$(\boldsymbol{A}\ \boldsymbol{b})=\begin{pmatrix}1&1&1&1\\1&2&a&d\\1&4&a^2&d^2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&1&1&1\\0&1&a-1&d-1\\0&0&(a-1)(a-2)&(d-1)(d-2)\end{pmatrix},$$

所以 $a=1$ 或 2, $d=1$ 或 2, 选 D.

6. 设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)$ 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{y}$ 下的标准形为 $2y_1^2+y_2^2-y_3^2$, 其中 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{e}_1,\boldsymbol{e}_2,\boldsymbol{e}_3)$. 若 $\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{e}_1,-\boldsymbol{e}_3,\boldsymbol{e}_2)$, 则 $f(x_1,x_2,x_3)$ 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 下的标准形为 (　)

A. $2y_1^2-y_2^2+y_3^2$　　B. $2y_1^2+y_2^2-y_3^2$　　C. $2y_1^2-y_2^2-y_3^2$　　D. $2y_1^2+y_2^2+y_3^2$

解 设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)$ 的矩阵为 $\boldsymbol{A}$, 由题意知 $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}2&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{pmatrix}$. 由初等变换与初等矩阵的关系知 $\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&-1&0\end{pmatrix}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{C}$, 于是

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}&=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P})\boldsymbol{C}\\&=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&-1\\0&1&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}2&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&-1&0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&0&0\\0&-1&0\\0&0&1\end{pmatrix},\end{aligned}$$

因此 $f(x_1,x_2,x_3)$ 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}$ 下的标准形为 $2y_1^2-y_2^2+y_3^2$, 选 A.

7. 设 A, B 为任意两个随机事件, 则 ( )

A. $P(AB) \leqslant P(A)P(B)$ B. $P(AB) \geqslant P(A)P(B)$

C. $P(AB) \leqslant \dfrac{P(A)+P(B)}{2}$ D. $P(AB) \geqslant \dfrac{P(A)+P(B)}{2}$

解 注意到 $P(AB) \leqslant P(A), P(AB) \leqslant P(B)$, 因此 $P(AB) \leqslant \dfrac{P(A)+P(B)}{2}$, 选 C.

8. 设随机变量 X, Y 不相关, 且 $EX = 2, EY = 1, DX = 3$, 则 $E[X(X+Y-2)] =$ ( )

A. -3 B. 3 C. -5 D. 5

解 由条件可得

$$\begin{aligned} E[X(X+Y-2)] &= E(X^2+XY-2X) = E(X^2)+E(XY)-2E(X) \\ &= D(X)+(EX)^2+E(X)E(Y)-2E(X) = 5, \end{aligned}$$

选 D.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. $\lim\limits_{x\to 0} \dfrac{\ln(\cos x)}{x^2} =$________.

解 利用洛必达法则得 $\lim\limits_{x\to 0} \dfrac{\ln(\cos x)}{x^2} = \lim\limits_{x\to 0} \dfrac{-\sin x}{2x\cos x} = -\dfrac{1}{2}$.

10. 设函数 $f(x)$ 连续, $\varphi(x) = \displaystyle\int_0^{x^2} xf(t)\mathrm{d}t$, 若 $\varphi(1) = 1, \varphi'(1) = 5$, 则 $f(1) =$________.

解 由条件 $\varphi(x) = x\displaystyle\int_0^{x^2} f(t)\mathrm{d}t$, 求导得 $\varphi'(x) = \displaystyle\int_0^{x^2} f(t)\mathrm{d}t + 2x^2 f(x^2)$, 故 $\varphi(1) = \displaystyle\int_0^1 f(t)\mathrm{d}t = 1, \varphi'(1) = 1+2f(1) = 5$, 则 $f(1) = 2$.

11. 若函数 $z = z(x, y)$ 由方程 $\mathrm{e}^{x+2y+3z} + xyz = 1$ 确定, 则 $\mathrm{d}z\big|_{(0,0)} =$________.

解 令 $x = y = 0$ 可得 $z(0,0) = 0$, 原方程两边同时求全微分得

$$\mathrm{e}^{x+2y+3z}(\mathrm{d}x + 2\mathrm{d}y + 3\mathrm{d}z) + xy\mathrm{d}z + yz\mathrm{d}x + xz\mathrm{d}y = 0.$$

令 $x = y = z = 0$ 得 $(\mathrm{d}x + 2\mathrm{d}y + 3\mathrm{d}z)\big|_{(0,0)} = 0$, 即 $\mathrm{d}z\big|_{(0,0)} = -\dfrac{1}{3}\mathrm{d}x - \dfrac{2}{3}\mathrm{d}y$.

12. 设函数 $y = y(x)$ 是微分方程 $y'' + y' - 2y = 0$ 的解, 且在 $x = 0$ 处取得极值 3, 则 $y(x) =$________.

解 由题意知 $y(0) = 3, y'(0) = 0$. 微分方程 $y'' + y' - 2y = 0$ 的特征方程为 $\lambda^2 + \lambda - 2 = 0$, 解得 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -2$, 所以微分方程的通解为 $y = C_1\mathrm{e}^x + C_2\mathrm{e}^{-2x}$. 代入 $y(0) = 3, y'(0) = 0$ 得 $C_1 = 2, C_2 = 1$, 故 $y = 2\mathrm{e}^x + \mathrm{e}^{-2x}$.

13. 设 3 阶矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $2, -2, 1$, $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A}^2 - \boldsymbol{A} + \boldsymbol{E}$, 其中 $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵, 则行列式 $|\boldsymbol{B}| =$________.

解 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $2,-2,1$ 则 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}^2-\boldsymbol{A}+\boldsymbol{E}$ 的特征值为 $3,7,1$, 因此 $|\boldsymbol{B}|=21$.

14.设二维随机变量 (X,Y) 服从正态分布 $N(1,0;1,1;0)$, 则 $P(XY-Y<0)=$________.

解 由 $(X,Y)\sim N(1,0;1,1;0)$ 知 $X\sim N(1,1), Y\sim N(0,1)$, 且 X,Y 相互独立, 所以

$$\begin{aligned}P(XY-Y<0)&=P((X-1)Y<0)=P(X-1>0,Y<0)+P(X-1<0,Y>0)\\&=P(X>1)P(Y<0)+P(X<1)P(Y>0)=\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}=\frac{1}{2}.\end{aligned}$$

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x)=x+a\ln(1+x)+bx\sin x, g(x)=kx^3$, 若 $f(x)$ 与 $g(x)$ 在 $x\to 0$ 时是等价无穷小, 求 a,b,k 的值.

解 当 $x\to 0$ 时, $\ln(1+x)=x-\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}+o\left(x^3\right), \sin x=x-\frac{x^3}{6}+o\left(x^3\right)$, 所以

$$\begin{aligned}f(x)&=x+a\ln(1+x)+bx\sin x=x+a\left(x-\frac{x^2}{2}+\frac{x^3}{3}\right)+bx^2+o\left(x^3\right)\\&=(1+a)x+\left(b-\frac{a}{2}\right)x^2+\frac{a}{3}x^3+o\left(x^3\right).\end{aligned}$$

因为 $f(x)$ 与 $g(x)=kx^3$ 当 $x\to 0$ 时为等价无穷小, 所以 $1+a=0, b-\frac{a}{2}=0, k=\frac{a}{3}$, 解得 $a=-1, b=-\frac{1}{2}, c=-\frac{1}{3}$.

提示: 这题不建议大家用洛必达法则, 因为洛必达法则说的是求导前的极限可以继承求导以后的极限的性质, 反过来是不对的. 也就是说由 $\lim\limits_{x\to 0}\frac{f(x)}{g(x)}=1$ 是无法直接得到 $\lim\limits_{x\to 0}\frac{f'(x)}{g'(x)}=1$ 的, 需要一些细节性的推导, 所以用泰勒公式一劳永逸.

16.(本题满分 10 分)

计算二重积分 $\iint\limits_D x(x+y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, 其中 $D=\{(x,y)|x^2+y^2\leqslant 2, y\geqslant x^2\}$.

解 区域 D 关于 y 轴对称, 则由对称性得

$$\begin{aligned}\iint\limits_D x(x+y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\iint\limits_D x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y&=2\int_0^1\mathrm{d}x\int_{x^2}^{\sqrt{2-x^2}}x^2\mathrm{d}y\\&=2\int_0^1 x^2\left(\sqrt{2-x^2}-x^2\right)\mathrm{d}x\\&=2\int_0^1 x^2\sqrt{2-x^2}\,\mathrm{d}x-\frac{2}{5}\end{aligned}$$

$$= 2\int_0^{\frac{\pi}{4}} 2\sin^2 t \cdot 2\cos^2 t \,\mathrm{d}t - \frac{2}{5} \quad \left(x = \sqrt{2}\sin t\right)$$
$$= 2\int_0^{\frac{\pi}{4}} \sin^2 2t \,\mathrm{d}t - \frac{2}{5} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 u \,\mathrm{d}u - \frac{2}{5} = \frac{\pi}{4} - \frac{2}{5}.$$

17.(**本题满分 10 分**)

为实现利润的最大化, 厂商需要对某商品确定其定价模型. 设 Q 为该商品的需求量, P 为价格, MC 为边际成本, η 为需求弹性 $(\eta > 0)$.

(1) 证明定价模型为 $P = \dfrac{\mathrm{MC}}{1-\frac{1}{\eta}}$;

(2) 若该商品的成本函数为 $C(Q) = 1600 + Q^2$, 需求函数为 $Q = 40 - P$, 试由 (1) 中的定价模型确定此商品的价格.

解 (1) 由于利润函数 $L(Q) = R(Q) - C(Q) = PQ - C(Q)$, 两边对 Q 求导得

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}Q} = P + Q\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}Q} - C'(Q) = P + Q\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}Q} - \mathrm{MC}.$$

当且仅当 $\dfrac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}Q} = 0$ 时, 利润 $L(Q)$ 最大. 又由于 $\eta = -\dfrac{P}{Q}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}P}$, 故当 $P = \dfrac{\mathrm{MC}}{1-\frac{1}{\eta}}$ 时, 利润最大.

(2) 由于 $\mathrm{MC} = C'(Q) = 2Q = 3(40 - P)$, 则 $\eta = -\dfrac{P}{Q}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}P}$, 代入 (1) 中的定价模型, 得 $P = \dfrac{2(40-P)}{1-\frac{40-P}{P}}$, 解得 $P = 30$.

18.(**本题满分 10 分**)

设函数 $f(x)$ 在定义域 I 上的导数大于零, 若对任意的 $x_0 \in I$, 曲线 $y = f(x)$ 在点 $\left(x_0, f(x_0)\right)$ 处的切线与直线 $x = x_0$ 及 x 轴所围成区域的面积恒为 4, 且 $f(0) = 2$, 求 $f(x)$ 的表达式.

解 曲线 $y = f(x)$ 在点 $\left(x_0, f(x_0)\right)$ 处的切线方程为 $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$, 此切线与 x 轴交点为 $\left(x_0 - \dfrac{f(x_0)}{f'(x_0)}, 0\right)$. 根据题设条件可知 $\dfrac{1}{2}\dfrac{|f(x_0)|}{f'(x_0)} \cdot |f(x_0)| = 4$, 即 $y = f(x)$ 满足方程 $y' = \dfrac{1}{8}y^2$, 解得 $y = -\dfrac{8}{8C + x}$. 因为 $f(0) = 2$, 所以 $C = -\dfrac{1}{2}$, 故 $f(x) = \dfrac{8}{4-x}$.

19.(**本题满分 10 分**)

(1) 设函数 $u(x), v(x)$ 可导, 利用导数定义证明

$$[u(x)v(x)]' = u'(x)v(x) + u(x)v'(x);$$

(2) 设 $u_1(x), u_2(x), \cdots, u_n(x)$ 可导, $f(x) = u_1(x)u_2(x)\cdots u_n(x)$, 写出 $f(x)$ 的求导公式.

解 (1) 因为函数 $u(x), v(x)$ 可导, 记 $f(x)=u(x)v(x)$, 则在任意点 x_0 处有

$$\begin{aligned}
f'(x_0) &= \lim_{x\to x_0}\frac{u(x)v(x)-u(x_0)v(x_0)}{x-x_0} \\
&= \lim_{x\to x_0}\frac{u(x)v(x)-u(x)v(x_0)+u(x)v(x_0)-u(x_0)v(x_0)}{x-x_0} \\
&= \lim_{x\to x_0}\frac{u(x)v(x)-u(x)v(x_0)}{x-x_0}+\lim_{x\to x_0}\frac{u(x)v(x_0)-u(x_0)v(x_0)}{x-x_0} \\
&= \lim_{x\to x_0}\frac{v(x)-v(x_0)}{x-x_0}u(x)+v(x_0)\lim_{x\to x_0}\frac{u(x)-u(x_0)}{x-x_0} \\
&= u(x_0)v'(x_0)+v(x_0)u'(x_0).
\end{aligned}$$

由 x_0 的任意性知 $[u(x)v(x)]'=u'(x)v(x)+u(x)v'(x)$.

(2) $f'(x)=u_1'(x)u_2(x)\cdots u_n(x)+u_1(x)u_2'(x)\cdots u_n(x)+\cdots+u_1(x)u_2(x)\cdots u_n'(x)$.

20.(本题满分 11 分)

设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} a & 1 & 0 \\ 1 & a & -1 \\ 0 & 1 & a \end{pmatrix}$, 且 $\boldsymbol{A}^3=\boldsymbol{O}$.

(1) 求 a 的值;

(2) 若矩阵 $\boldsymbol{X}$ 满足 $\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^2-\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^2=\boldsymbol{E}$, 其中 $\boldsymbol{E}$ 为 3 阶单位矩阵, 求 $\boldsymbol{X}$.

解 (1) 因为 $|\boldsymbol{A}|=\boldsymbol{O}$, 所以 $|\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix} a & 1 & 0 \\ 1 & a & -1 \\ 0 & 1 & a \end{vmatrix}=a^3=0$, 所以 $a=0$.

(2) 由 $\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^2-\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^2=\boldsymbol{E}$ 得 $(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{X}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^2)=\boldsymbol{E}$. 由 (1) 知

$$\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^2=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

因此

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})^{-1}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}^2)^{-1}=\begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 2 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 3 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -1 \\ 2 & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

21.(本题满分 11 分)

设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} 0 & 2 & -3 \\ -1 & 3 & -3 \\ 1 & -2 & a \end{pmatrix}$ 相似于矩阵 $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{pmatrix}$.

(1) 求 a, b 的值;

(2) 求可逆矩阵 $\boldsymbol{P}$, 使 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}$ 为对角矩阵.

解 (1) 由于矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与矩阵 $\boldsymbol{B}$ 相似, 所以 $\begin{cases}\operatorname{tr}(\boldsymbol{A})=\operatorname{tr}(\boldsymbol{B})\\|\boldsymbol{A}|=|\boldsymbol{B}|\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}3+a=2+b\\2a-3=b\end{cases}$, 解得 $\begin{cases}a=4\\b=5\end{cases}$.

(2) 由 (1) 知 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}0&2&-3\\-1&3&-3\\1&-2&4\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}1&-2&0\\0&5&0\\0&3&1\end{pmatrix}$, 由 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相似知 $|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}|=(\lambda-1)^2(\lambda-5)$, 故 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $\lambda_1=\lambda_2=1, \lambda_3=5$.

当 $\lambda_1=\lambda_2=1$ 时, 解方程组 $(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 得线性无关特征向量 $\boldsymbol{\xi}_1=(2,1,0)^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{\xi}_2=(-3,0,1)^{\mathrm{T}}$.

当 $\lambda_3=5$ 时, 解方程组 $(5\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 得特征向量 $\boldsymbol{\xi}_3=(-1,-1,1)^{\mathrm{T}}$.

取 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3)=\begin{pmatrix}2&-3&-1\\1&0&-1\\0&1&1\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&5\end{pmatrix}$ 为对角阵.

22.(本题满分 11 分)

设随机变量 X 的概率密度为

$$f(x)=\begin{cases}2^{-x}\ln 2, & x>0\\0, & x\leqslant 0\end{cases},$$

对 X 进行独立重复的观测, 直到第 2 个大于 3 的观测值出现时停止, 记 Y 为观测次数.

(1) 求 Y 的概率分布;

(2) 求 EY.

解 (1) 每次观测中, 观测值大于 3 的概率为 $p=P(X>3)=\int_3^{+\infty}2^{-x}\ln 2\mathrm{d}x=\frac{1}{8}$, 则 Y 的概率分布为 $P(Y=k)=\mathrm{C}_{k-1}^1\frac{1}{8}\left(1-\frac{1}{8}\right)^{k-2}\frac{1}{8}=(k-1)\left(\frac{7}{8}\right)^{k-2}\left(\frac{1}{8}\right)^2, k=2,3,\cdots$.

(2) Y 的数学期望为 $E(Y)=\sum\limits_{k=2}^{\infty}k(k-1)\left(\frac{7}{8}\right)^{k-2}\left(\frac{1}{8}\right)^2=16$, 其中我们用到幂级数

$$\sum_{k=2}^{\infty}k(k-1)x^{k-2}=\left(\sum_{k=0}^{\infty}x^k\right)''=\frac{2}{(1-x)^3}, -1<x<1.$$

23.(本题满分 11 分)

设总体 X 的概率密度为

$$f(x;\theta)=\begin{cases}\dfrac{1}{1-\theta}, & \theta\leqslant x\leqslant 1\\ 0, & \text{其他}\end{cases},$$

其中 θ 为未知参数. $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为来自该总体的简单随机样本.

(1) 求 θ 的矩估计量;

(2) 求 θ 的最大似然估计量.

解 (1) 由于总体 $X\sim U[\theta,1]$, 故总体均值 $E(X)=\dfrac{\theta+1}{2}$, 令 $E(X)=\bar{X}$ 得 $\theta=2\bar{X}-1$, 即 θ 的矩估计量为 $\hat{\theta}_1=2\bar{X}-1$.

(2) 设 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为样本 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 的观测值, 则似然函数为

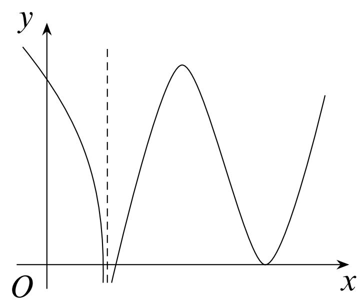
$$\begin{aligned}L(\theta)=\prod_{i=1}^{n}f(x_i;\theta)&=\begin{cases}\dfrac{1}{(1-\theta)^n}, & \theta\leqslant x_i\leqslant 1\,(i=1,2,\cdots,n)\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\\ &=\begin{cases}\dfrac{1}{(1-\theta)^n}, & \theta\leqslant \min\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}\leqslant 1\\ 0, & \text{其他}\end{cases}.\end{aligned}$$

当 $\theta\leqslant\min\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 时, 显然 $L(\theta)$ 关于 θ 单调递增, 则当 $\theta=\min\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 时 $L(\theta)$ 最大, 即 θ 的最大似然估计量为 $\hat{\theta}_2=\min\{X_1,X_2,\cdots,X_n\}$.

11　2016 年考研数学三

一　选择题, 1 ~ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 设函数 $f(x)$ 在 $(-\infty,+\infty)$ 内连续, 其导函数的图形如图所示, 则　　(　　)



第 1 题图

A. 函数 $f(x)$ 有 2 个极值点, 曲线 $y=f(x)$ 有 2 个拐点

B. 函数 $f(x)$ 有 2 个极值点, 曲线 $y=f(x)$ 有 3 个拐点

C. 函数 $f(x)$ 有 3 个极值点, 曲线 $y=f(x)$ 有 1 个拐点

D. 函数 $f(x)$ 有 3 个极值点, 曲线 $y=f(x)$ 有 2 个拐点

解　拐点是导函数单调性发生改变的点, 图中 $y=f'(x)$ 的图像有两个极值点都是导函数单调性改变的点, 都是拐点, 而虚线处左右两侧的导函数单调性也相反, 从而也是拐点, 即共有 3 个拐点. 导函数为零的点有 3 个, 但只有前面 2 个驻点左右两侧导数符号相反, 有 2 个极值点, 选 B.

2. 已知函数 $f(x)=\dfrac{e^x}{x-y}$, 则　　(　　)

A. $f'_x-f'_y=0$　　B. $f'_x+f'_y=0$　　C. $f'_x-f'_y=f$　　D. $f'_x+f'_y=f$

解　由 $f(x)=\dfrac{e^x}{x-y}$ 得 $f'_x(x,y)=\dfrac{e^x(x-y)-e^x}{(x-y)^2}$, $f'_y(x,y)=\dfrac{e^x}{(x-y)^2}$, 故 $f'_x(x,y)+f'_y(x,y)=\dfrac{e^x}{x-y}=f(x)$, 选 D.

3. 设 $J_i=\iint\limits_{D_i}\sqrt[3]{x-y}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\ (i=1,2,3)$, 其中

$$D_1=\{(x,y)|0\leqslant x\leqslant 1,0\leqslant y\leqslant 1\},$$
$$D_2=\{(x,y)|0\leqslant x\leqslant 1,0\leqslant y\leqslant \sqrt{x}\},$$
$$D_3=\{(x,y)|0\leqslant x\leqslant 1,x^2\leqslant y\leqslant 1\},$$

则 ( )

A. $J_1<J_2<J_3$ B. $J_3<J_1<J_2$ C. $J_2<J_3<J_1$ D. $J_2<J_1<J_3$

解 注意到被积函数 $\sqrt[3]{x-y}$ 当 $x>y$ 时为正, 当 $x<y$ 时为负, 画图比较三个积分区域易知选 B.

4. 级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\left(\dfrac{1}{\sqrt{n}}-\dfrac{1}{\sqrt{n+1}}\right)\sin(n+k)$(k 为常数) ( )

A. 绝对收敛 B. 条件收敛

C. 发散 D. 收敛性与 k 有关

解 注意到

$$\begin{aligned}\left|\left(\frac{1}{\sqrt{n}}-\frac{1}{\sqrt{n+1}}\right)\sin(n+k)\right| &\leqslant \frac{\sqrt{n+1}-\sqrt{n}}{\sqrt{n(n+1)}}\\ &=\frac{1}{\sqrt{n(n+1)}\left(\sqrt{n+1}+\sqrt{n}\right)}<\frac{1}{2n\sqrt{n}},\end{aligned}$$

由正项级数比较判别法知 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\left(\dfrac{1}{\sqrt{n}}-\dfrac{1}{\sqrt{n+1}}\right)\sin(n+k)$ 绝对收敛, 选 A.

5. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 是可逆矩阵, 且 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相似, 则下列结论错误的是 ( )

A. $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 相似 B. $\boldsymbol{A}^{-1}$ 与 $\boldsymbol{B}^{-1}$ 相似

C. $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{B}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 相似 D. $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{-1}$ 与 $\boldsymbol{B}+\boldsymbol{B}^{-1}$ 相似

解 由 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相似知存在可逆矩阵 $\boldsymbol{P}$ 使得 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}$, 因此

$$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P})^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}})^{-1},\boldsymbol{B}^{-1}=(\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P})^{-1}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P},$$

$$\boldsymbol{B}+\boldsymbol{B}^{-1}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}^{-1}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{-1})\boldsymbol{P},$$

因此 A, B, D 都是对的, C 选项是不对的, 如可取 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&2\\-2&-4\end{pmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}0&0\\0&-3\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 相似, 但 $\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}=\begin{pmatrix}2&0\\0&-8\end{pmatrix}$ 与 $\boldsymbol{B}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}=\begin{pmatrix}0&0\\0&-6\end{pmatrix}$ 不相似.

6. 设二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=a(x_1^2+x_2^2+x_3^2)+2x_1x_2+2x_2x_3+2x_1x_3$ 的正负惯性指数分别为 $1,2$, 则 ( )

A. $a > 1$ B. $a < -2$ C. $-2 < a < 1$ D. $a = 1$或$a = -2$

解 二次型 $f(x_1, x_2, x_3)$ 的矩阵 $\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} a & 1 & 1 \\ 1 & a & 1 \\ 1 & 1 & a \end{pmatrix}$, 由

$$|\lambda \boldsymbol{E} - \boldsymbol{A}| = \begin{vmatrix} \lambda - a & -1 & -1 \\ -1 & \lambda - a & -1 \\ -1 & -1 & \lambda - a \end{vmatrix} = (\lambda - a - 2)(\lambda - a + 1)^2 = 0$$

得 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $\lambda_1 = a + 2, \lambda_2 = \lambda_3 = a - 1$. 由于 $f(x_1, x_2, x_3)$ 的正负惯性指数分别为 $1, 2$, 即正负特征值个数分别为 $1, 2$, 因此 $\begin{cases} a + 2 > 0 \\ a - 1 < 0 \end{cases}$, 即 $-2 < a < 1$, 选 C.

7. 设 A, B 为两个随机事件, 且 $0 < P(A) < 1, 0 < P(B) < 1$, 如果 $P(A|B) = 1$, 则 ( )

A. $P(\bar{B}|\bar{A}) = 1$ B. $P(A|\bar{B}) = 1$ C. $P(A \cup B) = 1$ D. $P(B|A) = 1$

解 由条件得 $0 = P(B) - P(AB) = P(\bar{A}B) = P(\bar{A}) - P(\bar{A}\bar{B})$, 于是 $P(\bar{B}|\bar{A}) = \dfrac{P(\bar{A}\bar{B})}{P(\bar{A})} = 1$, 选 A.

8. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且 $X \sim N(1, 2), Y \sim N(1, 4)$, 则 $D(XY) =$ ( )

A. 6 B. 8 C. 14 D. 15

解

$$\begin{aligned} D(XY) &= E(X^2Y^2) - (EXY)^2 = (EX^2)(EY^2) - (EX)^2(EY)^2 \\ &= [DX + (EX)^2][DY + (EY)^2] - (EX)^2(EY)^2 = 14. \end{aligned}$$

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 已知函数 $f(x)$ 满足 $\lim\limits_{x \to 0} \dfrac{\sqrt{1 + f(x)\sin 2x} - 1}{\mathrm{e}^{3x} - 1} = 2$, 则 $\lim\limits_{x \to 0} f(x) =$________.

解 原极限存在, 且分母趋于 0, 所以分子趋于 0, 即 $\lim\limits_{x \to 0} f(x)\sin 2x = 0$, 利用等价无穷小替换得

$$2 = \lim_{x \to 0} \frac{\sqrt{1 + f(x)\sin 2x} - 1}{\mathrm{e}^{3x} - 1} = \lim_{x \to 0} \frac{\frac{1}{2} f(x)\sin 2x}{3x} = \lim_{x \to 0} \frac{f(x)}{3} \Rightarrow \lim_{x \to 0} f(x) = 6.$$

10. 极限 $\lim\limits_{n \to \infty} \dfrac{1}{n^2}\left(\sin \dfrac{1}{n} + 2\sin \dfrac{2}{n} + \cdots + n\sin \dfrac{n}{n}\right) =$________.

解 利用定积分定义可得

$$\lim_{n \to \infty} \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^{n} k \sin \frac{k}{n} = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \frac{k}{n} \sin \frac{k}{n}$$

$$=\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{k}{n}\sin\frac{k}{n}=\int_0^1 x\sin x\mathrm{d}x=\sin 1-\cos 1.$$

11.设函数 $f(u,v)$ 可微, $z=z(x,y)$ 由方程 $(x+1)z-y^2=x^2f(x-z,y)$ 确定, 则 $\mathrm{d}z\big|_{(0,1)}=$________.

解 原方程两边分别对 x,y 求偏导数得

$$\begin{cases} z+(x+1)z'_x=2xf(x-z,y)+x^2\left(1-z'_x\right)f'_1(x-z,y) \\ (x+1)z'_y-2y=x^2\left(-z'_yf'_1(x-z,y)+f'_2(x-z,y)\right) \end{cases}.$$

代入 $x=0,y=1,z=1$ 可得 $z'_x(0,1)=-1,z'_y(0,1)=2$, 因此 $\mathrm{d}z\big|_{(0,1)}=-\mathrm{d}x+2\mathrm{d}y$.

12.设 $D=\{(x,y)\,||x|\leqslant y\leqslant 1,-1\leqslant x\leqslant 1\}$, 则 $\iint\limits_D x^2\mathrm{e}^{-y^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=$________.

解 设 D_1 是 D 在第一象限的部分, 根据对称性可得

$$\begin{aligned}\iint\limits_D x^2\mathrm{e}^{-y^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y&=2\iint\limits_{D_1}x^2\mathrm{e}^{-y^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=2\int_0^1\mathrm{d}y\int_0^y x^2\mathrm{e}^{-y^2}\mathrm{d}x\\&=\frac{2}{3}\int_0^1 y^3\mathrm{e}^{-y^2}\mathrm{d}y=\frac{1}{3}-\frac{2}{3\mathrm{e}}.\end{aligned}$$

13.行列式 $\begin{pmatrix}\lambda&-1&0&0\\0&\lambda&-1&0\\0&0&\lambda&-1\\4&3&2&\lambda+1\end{pmatrix}=$________.

解 直接按照第一列展开得

$$\begin{aligned}\begin{vmatrix}\lambda&-1&0&0\\0&\lambda&-1&0\\0&0&\lambda&-1\\4&3&2&\lambda+1\end{vmatrix}&=\lambda\begin{vmatrix}\lambda&-1&0\\0&\lambda&-1\\3&2&\lambda+1\end{vmatrix}-4\begin{vmatrix}-1&0&0\\\lambda&-1&0\\0&\lambda&-1\end{vmatrix}\\&=\lambda\left(\lambda\begin{vmatrix}\lambda&-1\\2&\lambda+1\end{vmatrix}+3\begin{vmatrix}-1&0\\\lambda&-1\end{vmatrix}\right)+4\\&=\lambda^4+\lambda^3+2\lambda^2+3\lambda+4.\end{aligned}$$

14.设袋中有红、白、黑球各 1 个, 从中有放回地取球, 每次取 1 个, 直到三种颜色的球都取到时停止, 则取球次数恰为 4 的概率为________.

解 4 次取球总的取法数为 $3^4=81$, 要想取 4 次结束, 则前 3 次刚好只取到了两种颜色, 第 4 次取到了第三种颜色, 因此所求概率为 $p=\dfrac{\mathrm{C}_3^2\mathrm{C}_3^1\times 2}{81}=\dfrac{2}{9}$.

三　解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to 0}(\cos 2x+2x\sin x)^{\frac{1}{x^4}}$.

解 首先有 $\lim\limits_{x\to 0}(\cos 2x+2x\sin x)^{\frac{1}{x^4}}=\exp\left(\lim\limits_{x\to 0}\dfrac{\ln(\cos 2x+2x\sin x)}{x^4}\right)$, 其中

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{\ln(\cos 2x+2x\sin x)}{x^4}&=\lim_{x\to 0}\frac{\ln(\cos 2x+2x\sin x-1+1)}{x^4}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{\cos 2x+2x\sin x-1}{x^4}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{2x\sin x-2\sin^2 x}{x^4}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{2\sin x(x-\sin x)}{x^4}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{2x\cdot\frac{1}{6}x^3}{x^4}=\frac{1}{3},\end{aligned}$$

因此原极限为 $e^{\frac{1}{3}}$.

16.(本题满分 10 分)

设某商品最大需求量为 1200 件, 该商品的需求函数 $Q=Q(p)$, 需求弹性 $\eta=\dfrac{p}{120-p}(\eta>0)$, p 为单价 (万元).

(1) 求需求函数的表达式;

(2) 求 $p=100$ 万元时的边际收益, 并说明其经济意义.

解 (1) 由弹性的计算公式 $\eta=\left|\dfrac{p}{Q}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}p}\right|$ 可知 $\dfrac{p}{Q}\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}p}=\dfrac{-p}{120-p}$, 分离变量解方程得到 $Q=C(p-120)$, 其中 C 为任意常数. 又商品的最大需求量为 1200 件, 则 $p=0$ 时 $Q=1200$, 因此 $C=-10$, 则 $Q=10(120-p)$.

(2) 收益函数 $R(p)=pQ=\dfrac{Q(1200-Q)}{10}=120Q-\dfrac{Q^2}{10}$, 边际收益为 $R'(Q)=120-\dfrac{Q}{5}$. 当 $p=100$ 时, $Q=200$, 此时边际收益为 $R'(200)=80$, 其经济意义为当单价为 100 万元时, 需求量每增加 1 件, 收益将增加 80 万元.

17.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x)=\displaystyle\int_0^1|t^2-x^2|\mathrm{d}t\,(x>0)$, 求 $f'(x)$ 并求 $f(x)$ 的最小值.

解 首先

$$f(x)=\begin{cases}\displaystyle\int_0^x\left(x^2-t^2\right)\mathrm{d}t+\int_x^1\left(t^2-x^2\right)\mathrm{d}t=\frac{4}{3}x^3-x^2+\frac{1}{3}, & 0<x<1\\ \displaystyle\int_0^1\left(x^2-t^2\right)\mathrm{d}t=x^2-\frac{1}{3}, & x\geqslant 1\end{cases},$$

于是 $f'(x)=\begin{cases}4x^2-2x, & 0<x<1\\ 2x, & x\geqslant 1\end{cases}$. 当 $x\geqslant 1$ 时, $f'(x)=2x>0$; 当 $0<x<1$ 时, 令 $f'(x)=4x^2-2x=0$ 得 $x=\dfrac{1}{2}$, 且 $f''\left(\dfrac{1}{2}\right)=2>0$, 因此 $x=\dfrac{1}{2}$ 是唯一的极小值点, 从而是最小值点, 故 $f_{\min}(x)=f\left(\dfrac{1}{2}\right)=\dfrac{1}{4}$.

18.(**本题满分 10 分**)

设函数 $f(x)$ 连续, 且满足 $\int_0^x f(x-t)\mathrm{d}t=\int_0^x (x-t)f(t)\mathrm{d}t+\mathrm{e}^{-x}-1$, 求 $f(x)$.

解 首先有 $\int_0^x f(x-t)\mathrm{d}t \xlongequal{x-t=u} \int_0^x f(u)\mathrm{d}u$, 因此原方程化为

$$\int_0^x f(u)\mathrm{d}u=x\int_0^x f(t)\mathrm{d}t-\int_0^x tf(t)\mathrm{d}t+\mathrm{e}^{-x}-1.$$

上式两边求导得 $f(x)=\int_0^x f(t)\mathrm{d}t+xf(x)-xf(x)-\mathrm{e}^{-x}=\int_0^x f(t)\mathrm{d}t-\mathrm{e}^{-x}$. 注意到此方程右边可导, 从而继续求导得 $f'(x)=f(x)+\mathrm{e}^{-x}$, 且 $f(0)=-1$, 解此一阶线性微分方程得 $f(x)=-\dfrac{1}{2}\mathrm{e}^{x}-\dfrac{1}{2}\mathrm{e}^{-x}$.

19.(**本题满分 10 分**)

求幂级数 $\sum\limits_{n=0}^{\infty}\dfrac{x^{2n+2}}{(n+1)(2n+1)}$ 的收敛域及和函数.

解 记 $u_n(x)=\dfrac{x^{2n+2}}{(n+1)(2n+1)}$, 则 $\lim\limits_{n\to\infty}\left|\dfrac{u_n(x)}{u_{n-1}(x)}\right|=\lim\limits_{n\to\infty}\left|\dfrac{n(2n-1)x^2}{(n+1)(2n+1)}\right|=x^2$. 令 $x^2<1$ 得 $-1<x<1$, 因此幂级数的收敛区间为 $(-1,1)$. 且当 $x=\pm 1$ 时,

$$\begin{aligned}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(n+1)(2n+1)}&=2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+2)(2n+1)}\\&=2\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{1}{2n+1}-\frac{1}{2n+2}\right)=2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{n}=2\ln 2,\end{aligned}$$

因此幂级数的收敛域为 $[-1,1]$. 当 $x\in(-1,1)$ 时, 注意到

$$\begin{aligned}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^{2n+2}}{(n+1)(2n+1)}&=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^{2n+2}}{2n+1}-\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^{2n+2}}{n+1}\\&=x\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^{2n+1}}{2n+1}-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(x^2)^n}{n},\end{aligned}$$

其中 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{(x^2)^n}{n}=-\ln\left(1-x^2\right)$, 而

$$\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^{2n+2}}{n+1}=2\int_0^x\sum_{n=0}^{\infty}t^{2n}\mathrm{d}t=2\int_0^x\frac{\mathrm{d}t}{1-t^2}=\ln\frac{1+x}{1-x},$$

因此原幂级数的和函数为 $S(x)=\begin{cases} x\ln\dfrac{1+x}{1-x}+\ln(1-x^2), & x\in(-1,1) \\ 2\ln 2, & x=\pm 1 \end{cases}$.

20.(本题满分 11 分)

设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 2 & a & 1 \\ -1 & 1 & a \end{pmatrix}$, $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 1 & a \\ -a-1 & -2 \end{pmatrix}$. 当 a 为何值时, 方程 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 无解、有唯一解、有无穷多解? 在有解时, 求解此方程.

解 对方程的增广矩阵 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$ 作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 2 & a & 1 & 1 & a \\ -1 & 1 & a & -a-1 & -2 \end{pmatrix}\to\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 0 & a+2 & 3 & -3 & a-4 \\ 0 & 0 & a-1 & 1-a & 0 \end{pmatrix}.$$

当 $a\neq 1$ 且 $a\neq -2$ 时, $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 0 & a+3 & 3 & -3 & a-4 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}\to\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & \dfrac{3a}{a+2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dfrac{a-4}{a+2} \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$,

此时方程 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 有唯一解, 且 $\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} 1 & \dfrac{3a}{a+2} \\ 0 & \dfrac{a-4}{a+2} \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$.

当 $a=1$ 时, $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 3 & -3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\to\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 此时方程 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 有无穷多解, 且 $\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k_1 & k_2 \\ -k_1 & -k_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_1-1 & k_2-1 \\ -k_1 & -k_2 \end{pmatrix}$, 其中 k_1,k_2 为任意常数.

当 $a=-2$ 时, 由于 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & -3 & -6 \\ 0 & 0 & -3 & 3 & 0 \end{pmatrix}\to\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 此时方程 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$ 无解.

21.(本题满分 11 分)

已知矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 2 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

(1) 求 $\boldsymbol{A}^{99}$;

(2) 设 3 阶矩阵 $\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$ 满足 $\boldsymbol{B}^2=\boldsymbol{B}\boldsymbol{A}$, 记 $\boldsymbol{B}^{100}=(\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3)$, 将 $\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3$ 分别表示为 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 的线性组合.

解 (1) 首先由 $|\lambda \boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}\lambda & 1 & -1\\ -2 & \lambda+3 & 0\\ 0 & 0 & \lambda\end{vmatrix}=\lambda(\lambda+1)(\lambda+2)$ 知 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $\lambda_1=-1,\lambda_2=-2,\lambda_3=0$.

当 $\lambda_1=-1$ 时, 解方程组 $(-\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 得特征向量 $\boldsymbol{\xi}_1=(1,1,0)^{\mathrm{T}}$.

当 $\lambda_2=-2$ 时, 解方程组 $(-2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 得特征向量 $\boldsymbol{\xi}_2=(1,2,0)^{\mathrm{T}}$.

当 $\lambda_3=0$ 时, 解方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$, 得特征向量 $\boldsymbol{\xi}_3=(3,2,2)^{\mathrm{T}}$.

令 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_2)=\begin{pmatrix}1&1&3\\1&2&2\\0&0&2\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&-2&0\\0&0&0\end{pmatrix}\triangleq\boldsymbol{\Lambda}$, 所以

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{A}^{99}&=(\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{P}^{-1})^{99}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda}^{99}\boldsymbol{P}^{-1}\\
&=\begin{pmatrix}1&1&3\\1&2&2\\0&0&2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&(-2)^{99}&0\\0&0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}2&-1&-2\\-1&1&1/2\\0&0&1/2\end{pmatrix}\\
&=\begin{pmatrix}2^{99}-2 & 1-2^{99} & 2-2^{98}\\ 2^{100}-2 & 1-2^{100} & 2-2^{99}\\ 0&0&0\end{pmatrix}.
\end{aligned}
$$

(2) 由 $\boldsymbol{B}^2=\boldsymbol{B}\boldsymbol{A}$ 知 $\boldsymbol{B}^{100}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{A}^{99}=(\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3)$, 即 $\boldsymbol{\beta}_1=(2^{99}-2)\boldsymbol{\alpha}_1+(2^{100}-2)\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\beta}_2=(1-2^{99})\boldsymbol{\alpha}_1+(1-2^{100})\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\beta}_3=(2-2^{98})\boldsymbol{\alpha}_1+(2-2^{99})\boldsymbol{\alpha}_2$.

22.(本题满分 11 分)

设二维随机变量 (X,Y) 在区域 $D=\{(x,y)|0<x<1,x^2<y<\sqrt{x}\}$ 上服从均匀分布, 令 $U=\begin{cases}1, & X\leqslant Y\\ 0, & X>Y\end{cases}$.

(1) 写出 (X,Y) 的概率密度;

(2) 问 U 与 X 是否相互独立? 并说明理由;

(3) 求 $Z=U+X$ 的分布函数 $F(z)$.

解 (1) (X,Y) 的概率密度为 $f(x,y)=\begin{cases}\dfrac{1}{S_D}, & (x,y)\in D\\ 0, & \text{其他}\end{cases}=\begin{cases}3, & (x,y)\in D\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$.

(2) 对 $0<t<1$, 有

$$P(U\leqslant 0,X\leqslant t)=P(X>Y,X\leqslant t)=\int_0^t \mathrm{d}x\int_{x^2}^{x}3\,\mathrm{d}y=\frac{3}{2}t-t^3,$$

$$P(U\leqslant 0)=P(X>Y)=\frac{1}{2},P(X\leqslant t)=\int_0^t \mathrm{d}x\int_{x^2}^{\sqrt{x}}3\,\mathrm{d}y=2t^{\frac{3}{2}}-t^3.$$

由于 $P(U\leqslant 0,X\leqslant t)\neq P(U\leqslant 0)P(X\leqslant t)$, 所以 U 与 X 不独立.

(3)

$$\begin{aligned}
F(z)&=P(U+X\leqslant z)=P(U+X\leqslant z,U=0)+P(U+X\leqslant z,U=1)\\
&=P(X\leqslant z,X>Y)+P(1+X\leqslant z,X\leqslant Y)\\
&=\begin{cases}0, & z<0\\ \frac{3}{2}z^2-z^3, & 0\leqslant z<1\\ \frac{1}{2}, & z\geqslant 1\end{cases}+\begin{cases}0, & z<1\\ 2(z-1)^{\frac{3}{2}}-\frac{3}{2}(z-1)^2, & 1\leqslant z<2\\ \frac{1}{2}, & z\geqslant 2\end{cases}\\
&=\begin{cases}0, & z<0\\ \frac{3}{2}z^2-z^3, & 0\leqslant z<1\\ \frac{1}{2}+2(z-1)^{\frac{3}{2}}-\frac{3}{2}(z-1)^2, & 1\leqslant z<2\\ 1, & z\geqslant 2\end{cases}.
\end{aligned}$$

23.(本题满分 11 分)

设总体 X 的概率密度为 $f(x;\theta)=\begin{cases}\frac{3x^2}{\theta^3}, & 0<x<\theta\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$, 其中 $\theta\in(0,+\infty)$ 为未知参数. X_1,X_2,X_3 为来自总体 X 的简单随机样本, 令 $T=\max\{X_1,X_2,X_3\}$.

(1) 求 T 的概率密度;

(2) 确定 a, 使得 $E(aT)=\theta$.

解 (1) T 的分布函数为

$$\begin{aligned}
F(t)&=P(T\leqslant t)=P\big(\max\{X_1,X_2,X_3\}\leqslant t\big)=P(X_1\leqslant t,X_2\leqslant t,X_3\leqslant t)\\
&=\begin{cases}0, & t\leqslant 0\\ \left(\int_0^t\frac{3x^2}{\theta^3}\mathrm{d}\theta\right)^3, & 0<t<\theta\\ 1, & t\geqslant\theta\end{cases}=\begin{cases}0, & t\leqslant 0\\ \frac{t^9}{\theta^9}. & 0<t<\theta\\ 1, & t\geqslant\theta\end{cases}.
\end{aligned}$$

因此 T 的概率密度为 $f(t)=F'(t)=\begin{cases}\frac{9t^2}{\theta^9}, & 0<t<\theta\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$.

(2) 令 $E(aT)=\int_0^\theta at\frac{9t^2}{\theta^9}\mathrm{d}\theta=\frac{9}{10}a\theta=\theta$, 解得 $a=\frac{10}{9}$.

12　2017 年考研数学三

一　选择题, 1 ~ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 若函数 $f(x)=\begin{cases}\dfrac{1-\cos\sqrt{x}}{ax}, & x>0\\ b, & x\leqslant 0\end{cases}$ 在 $x=0$ 处连续, 则 (　)

A. $ab=\dfrac{1}{2}$　　B. $ab=-\dfrac{1}{2}$　　C. $ab=0$　　D. $ab=2$

解 由 $f(x)$ 在 $x=0$ 处连续得 $\lim\limits_{x\to0^+}f(x)=f(0)$, 即

$$\lim_{x\to0^+}\frac{1-\cos\sqrt{x}}{ax}=\frac{1}{2a}=b\Rightarrow ab=\frac{1}{2},$$

选 A.

2. 二元函数 $z=xy(3-x-y)$ 的极值点是 (　)

A. $(0,0)$　　B. $(0,3)$　　C. $(3,0)$　　D. $(1,1)$

解 由 $\begin{cases}\dfrac{\partial z}{\partial x}=3y-2xy-y^2=0\\ \dfrac{\partial z}{\partial y}=3x-x^2-2xy=0\end{cases}$ 可得四个驻点 $(0,0),(0,3),(3,0),(1,1)$. 令 $A=\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2}=-2y, B=\dfrac{\partial^2 z}{\partial x\partial y}=3-2x-2y, C=\dfrac{\partial^2 z}{\partial y^2}=-2x$, 在四个驻点处分别考虑判别式 $AC-B^2$ 的正负, 只有在 $(x,y)=(1,1)$ 处有 $AC-B^2=3>0$, 且 $A=C=-2<0$, 因此 $(1,1)$ 为极大值点. 其他选项都不满足, 选 D.

3. 设函数 $f(x)$ 可导, 且 $f(x)\cdot f'(x)>0$, 则 (　)

A. $f(1)>f(-1)$　　B. $f(1)<f(-1)$

C. $|f(1)|>|f(-1)|$　　D. $|f(1)|<|f(-1)|$

解 由 $f(x)f'(x)>0$ 可知 $[f^2(x)]'=2f(x)f'(x)>0$, 因此 $f^2(x)$ 单调递增, 有 $f^2(1)>f^2(-1)$, 即 $|f(1)|>|f(-1)|$, 选 C.

4. 若级数 $\sum\limits_{n=2}^{\infty}\left[\sin\dfrac{1}{n}-k\ln\left(1-\dfrac{1}{n}\right)\right]$ 收敛, 则 $k=$ (　)

A. 1　　B. 2　　C. -1　　D. -2

解 利用泰勒公式可得知当 $n \to \infty$ 时,

$$\begin{aligned}\sin\frac{1}{n} - k\ln\left(1-\frac{1}{n}\right) &= \frac{1}{n} - k\left(-\frac{1}{n}-\frac{1}{2n^2}\right) + o\left(\frac{1}{n^2}\right)\\ &= \left(1+\frac{1}{k}\right)\frac{1}{n} + \frac{k}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right),\end{aligned}$$

因此当且仅当 $1+k=0$ 即 $k=-1$ 时原级数收敛, 选 C.

5. 设 $\boldsymbol{\alpha}$ 为 n 维单位列向量, $\boldsymbol{E}$ 为 n 阶单位矩阵, 则 ( )

A. $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 不可逆 B. $\boldsymbol{E}+\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 不可逆

C. $\boldsymbol{E}+2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 不可逆 D. $\boldsymbol{E}-2\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 不可逆

解 矩阵 $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 的秩为 1, 它有 $n-1$ 个特征值为 0, 第 n 个特征值为 $\lambda=\mathrm{tr}(\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}})=\|\boldsymbol{\alpha}\|^2=1$, 因此 $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}$ 有一个特征值为 0, 不可逆, 其他矩阵都可逆, 选 A.

6. 已知矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}2&0&0\\0&2&1\\0&0&1\end{pmatrix}, \boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}2&1&0\\0&2&0\\0&0&1\end{pmatrix}, \boldsymbol{C}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&2&0\\0&0&2\end{pmatrix}$, 则 ( )

A. $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 相似, $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 相似 B. $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 相似, $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 不相似

C. $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 不相似, $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 相似 D. $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 不相似, $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 不相似

解 注意到 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 的特征值都是 $2,2,1$, 要判断 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 是否可对角化, 充要条件是矩阵的每一个特征值对应的线性无关特征向量的个数等于其特征值的重数, 因此只需要看特征值 $\lambda=2$ 的情形即可. 对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 有 $r(2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})=1$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 的二重特征值 2 有两个线性无关特征向量, 可对角化, 即 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 相似. 对矩阵 $\boldsymbol{B}$, 有 $r(2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})=2$, 它是不可对角化的, $\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{C}$ 不相似, 选 B.

7. 设 A,B,C 为三个随机事件, 且 A 与 C 相互独立, B 与 C 相互独立, 则 $A\cup B$ 与 C 相互独立的充分必要条件是 ( )

A. A 与 B 相互独立 B. A 与 B 互不相容

C. AB 与 C 相互独立 D. AB 与 C 互不相容

解 $A\cup B$ 与 C 相互独立 $\Leftrightarrow P\big((A\cup B)C\big)=P(A\cup B)P(C)$, 由题意有

$$\begin{aligned}P\big((A\cup B)C\big) &= P(AC\cup BC) = P(AC)+P(BC)-P(ABC),\\ &= P(A)P(C)+P(B)P(C)-P(ABC),\\ P(A\cup B)P(C) &= \big(P(A)+P(B)-P(AB)\big)P(C)\\ &= P(A)P(C)+P(B)P(C)-P(AB)P(C),\end{aligned}$$

因此得到 $P(ABC)=P(AB)P(C)$, 选 C.

8. 设 $X_1,X_2,\cdots,X_n(n\geqslant 2)$ 为来自正态总体 $N(\mu,1)$ 的简单随机样本, 记 $\bar{X}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}X_i$, 则下列结论中不正确的是 ( )

A. $\sum_{i=1}^{n}(X_i-\mu)^2$ 服从 χ^2 分布　　B. $2(X_n-X_1)^2$ 服从 χ^2 分布

C. $\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2$ 服从 χ^2 分布　　D. $n(\bar{X}-\mu)^2$ 服从 χ^2 分布

解 对选项 B 有 $X_n-X_1\sim N(0,2)$, $\dfrac{X_n-X_1}{\sqrt{2}}\sim N(0,1)$, $\dfrac{(X_n-X_1)^2}{2}\sim\chi^2(1)$, B 不正确, 选项 A, C, D 都是基本结论, 都正确, 选 B.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. $\displaystyle\int_{-\pi}^{\pi}\left(\sin^3 x+\sqrt{\pi^2-x^2}\right)\mathrm{d}x=$________.

解 利用定积分的区间对称性和几何意义可得

$$\int_{-\pi}^{\pi}\left(\sin^3 x+\sqrt{\pi^2-x^2}\right)\mathrm{d}x=\int_{-\pi}^{\pi}\sqrt{\pi^2-x^2}\,\mathrm{d}x=\frac{\pi^3}{2}.$$

10.差分方程 $y_{t+1}-2y_t=2^t$ 的通解为 $y=$________.

解 首先齐次差分方程 $y_{t+1}-2y_t=0$ 的通解为 $Y_t=C\cdot 2^t$. 设非齐次方程 $y_{t+1}-2y_t=2^t$ 的一个特解为 $t_t=At\cdot 2^t$, 代入方程可得 $A=\dfrac{1}{2}$, 因此差分方程 $y_{t+1}-2y_t=2^t$ 的通解为 $y_t=C\cdot 2^t+t\cdot 2^{t-1}$, C 为任意常数.

11.设生产某产品的平均成本 $\bar{C}(Q)=1+\mathrm{e}^{-Q}$, 其中 Q 为产量, 则边际成本为________.

解 总成本为 $C(Q)=Q\left(1+\mathrm{e}^{-Q}\right)$, 因此边际成本为 $C'(Q)=1+\mathrm{e}^{-Q}(1-Q)$.

12.设函数 $f(x,y)$ 具有一阶连续偏导数, 且 $\mathrm{d}f(x,y)=y\mathrm{e}^y\mathrm{d}x+x(1+y)\mathrm{e}^y\mathrm{d}y$, $f(0,0)=0$, 则 $f(x,y)=$________.

解 容易知道 $\mathrm{d}f(x,y)=y\mathrm{e}^y\mathrm{d}x+x(1+y)\mathrm{e}^y\mathrm{d}y=\mathrm{d}(xy\mathrm{e}^y)$, 因此 $f(x,y)=xy\mathrm{e}^y+C$, 再由 $f(0,0)=0$ 知 $C=0$, 因此 $f(x,y)=xy\mathrm{e}^y$.

13.设矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&0&1\\1&1&2\\0&1&1\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 为线性无关的 3 维列向量组, 则向量组 $\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\boldsymbol{A\alpha}_3$ 的秩为 ________.

解 依题意知 $(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$ 为可逆矩阵, 所以

$$r(\boldsymbol{A\alpha}_1,\boldsymbol{A\alpha}_2,\boldsymbol{A\alpha}_3)=r\big(\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)\big)=r(\boldsymbol{A})=2.$$

14.设随机变量 X 的概率分布为 $P(X=-2)=\dfrac{1}{2}$, $P(X=1)=a$, $P(X=3)=b$, 若 $EX=0$, 则 $DX=$____.

解 由分布律的归一性可知 $\dfrac{1}{2}+a+b=1$. 而 $EX=-2\times\dfrac{1}{2}+a+3b=0$, 所以 $a=b=\dfrac{1}{4}$. 从而 $EX^2=(-2)^2\times\dfrac{1}{2}+1^2\times\dfrac{1}{4}+3^2\times\dfrac{1}{4}=\dfrac{9}{2}$, $DX=EX^2-(EX)^2=\dfrac{9}{2}$.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

求极限 $\lim\limits_{x\to 0^+}\dfrac{\int_0^x \sqrt{x-t}\,\mathrm{e}^t\,\mathrm{d}t}{\sqrt{x^3}}$.

解 令 $u=x-t$, 则 $\displaystyle\int_0^x \sqrt{x-t}\,\mathrm{e}^t\,\mathrm{d}t=\mathrm{e}^x\int_0^x \sqrt{u}\,\mathrm{e}^{-u}\,\mathrm{d}u$, 故原极限

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0^+}\frac{\int_0^x \sqrt{x-t}\,\mathrm{e}^t\,\mathrm{d}t}{\sqrt{x^3}}&=\lim_{x\to 0^+}\frac{\mathrm{e}^x\int_0^x \sqrt{u}\,\mathrm{e}^{-u}\,\mathrm{d}u}{\sqrt{x^3}}=\lim_{x\to 0^+}\frac{\int_0^x \sqrt{u}\,\mathrm{e}^{-u}\,\mathrm{d}u}{\sqrt{x^3}}\\&=\lim_{x\to 0^+}\frac{\sqrt{x}\,\mathrm{e}^{-x}}{\frac{3}{2}\sqrt{x}}=\frac{2}{3}.\end{aligned}$$

16.(本题满分 10 分)

计算积分 $\displaystyle\iint\limits_D \frac{y^3}{(1+x^2+y^4)^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y$, 其中 D 是第一象限中以曲线 $y=\sqrt{x}$ 与 x 轴为边界的无界区域.

解 直接化为累次积分得

$$\begin{aligned}\iint\limits_D \frac{y^3}{(1+x^2+y^4)^2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y&=\int_0^{+\infty}\mathrm{d}x\int_0^{\sqrt{x}}\frac{y^3}{(1+x^2+y^4)^2}\mathrm{d}y\\&=\frac{1}{4}\int_0^{+\infty}\left(-\frac{1}{1+x^2+y^4}\right)\Bigg|_{y=0}^{y=\sqrt{x}}\mathrm{d}x\\&=\frac{1}{4}\int_0^{+\infty}\left(\frac{1}{1+x^2}-\frac{1}{1+2x^2}\right)\mathrm{d}x=\frac{\pi}{8}\left(1-\frac{\sqrt{2}}{2}\right).\end{aligned}$$

17.(本题满分 10 分)

求 $\lim\limits_{n\to\infty}\sum\limits_{k=1}^{n}\dfrac{k}{n^2}\ln\left(1+\dfrac{k}{n}\right)$.

解 利用定积分的定义可得

$$\begin{aligned}\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{k}{n}\ln\left(1+\frac{k}{n}\right)&=\int_0^1 x\ln(1+x)\,\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\int_0^1\ln(1+x)\,\mathrm{d}(x^2)\\&=\frac{\ln 2}{2}-\frac{1}{2}\int_0^1\frac{x^2}{1+x}\mathrm{d}x\\&=\frac{\ln 2}{2}-\frac{1}{2}\int_0^1\left(x-1+\frac{1}{1+x}\right)\mathrm{d}x\\&=\frac{1}{4}.\end{aligned}$$

18.(本题满分 10 分)

已知方程 $\dfrac{1}{\ln(1+x)}-\dfrac{1}{x}=k$ 在区间 $(0,1)$ 内有实根, 求 k 的范围.

解 令 $f(x)=\dfrac{1}{\ln(1+x)}-\dfrac{1}{x}$, 方程 $f(x)=k$ 有实根的充要条件是 k 在 $f(x)$ 的值域内. 求导得

$$f'(x)=-\frac{1}{(x+1)\ln^2(1+x)}+\frac{1}{x^2}=\frac{-x^2+(x+1)\ln^2(1+x)}{x^2(x+1)\ln^2(1+x)},$$

令 $g(x)=-x^2+(x+1)\ln^2(1+x)$, 则

$$g'(x)=-2x+\ln^2(1+x)+2\ln(1+x),$$
$$g''(x)=-2+\frac{2\ln(1+x)}{1+x}+\frac{2}{1+x}=\frac{-2x+2\ln(1+x)}{1+x},$$

因此 $g'(x)$ 在 $(0,1)$ 内单调递减, $g'(x)<g'(0)=0$, 故 $g(x)$ 也在 $(0,1)$ 内单调递减, $g(x)<g(0)=0$, 即 $f'(x),0$. 所以 $f(x)$ 在 $(0,1)$ 内单调递减. 而 $f(1)=\dfrac{1}{\ln 2}-1$,

$$\lim_{x\to0^+}f(x)=\lim_{x\to0^+}\frac{x-\ln(1+x)}{x\ln(1+x)}=\lim_{x\to0^+}\frac{x-\ln(1+x)}{x^2}=\frac{1}{2},$$

故 k 的取值范围是 $\left(\dfrac{1}{\ln 2}-1,\dfrac{1}{2}\right)$.

19.(本题满分 10 分)

设 $a_0=1,a_1=0,a_{n+1}=\dfrac{1}{n+1}(na_n+a_{n-1})(n=1,2,\cdots)$, $S(x)$ 为幂级数 $\sum\limits_{n=0}^{\infty}a_nx^n$ 的和函数.

(1) 证明幂级数 $\sum\limits_{n=0}^{\infty}a_nx^n$ 的收敛半径不小于 1;

(2) 证明 $(1-x)S'(x)-xS(x)=0,x\in(-1,1)$, 并求 $S(x)$ 的表达式.

解 (1) 由递推关系可得 $(n+1)a_{n+1}=na_n+a_{n-1}$, 即 $(n+1)(a_{n+1}-a_n)=-(a_n-a_{n-1})$, 因此

$$a_{n+1}-a_n=-\frac{1}{n+1}(a_n-a_{n-1})=\cdots=\frac{(-1)^n}{(n+1)!}(a_1-a_0)=\frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)!},$$

于是 $a_n=a_0+\sum\limits_{k=0}^{n-1}(a_{k+1}-a_k)=\sum\limits_{k=0}^{n}\dfrac{(-1)^k}{k!}\to e^{-1}$, 因此 $\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{a_{n+1}}{a_n}=1$, 这说明原幂级数的收敛半径就是 1.

(2) 因为 $S(x)=\sum\limits_{n=0}^{\infty}a_nx^n$ 且 $a_1=0$, 所以

$$S'(x)=\sum_{n=1}^{\infty}na_nx^{n-1}=\sum_{n=2}^{\infty}na_nx^{n-1}$$

$$
\begin{aligned}
&=\sum_{n=1}^{\infty}(n+1)\,a_{n+1}x^{n}=\sum_{n=1}^{\infty}\left(na_{n}+a_{n-1}\right)x^{n}\\
&=\sum_{n=1}^{\infty}na_{n}x^{n}+\sum_{n=1}^{\infty}a_{n-1}x^{n}=x\sum_{n=1}^{\infty}na_{n}x^{n-1}+\sum_{n=0}^{\infty}a_{n}x^{n+1}\\
&=xS'(x)+xS(x).
\end{aligned}
$$

所以有 $(1-x)\,S'(x)-xS(x)=0$, 且 $S(0)=a_0=1$, 解此微分方程得 $S(x)=\dfrac{\mathrm{e}^{-x}}{1-x}, x\in(-1,1)$.

20.(本题满分 11 分)

设三阶矩阵 $\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$ 有三个不同的特征值, 且 $\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{\alpha}_1+2\boldsymbol{\alpha}_2$.

(1) 证明: $r(\boldsymbol{A})=2$;

(2) 若 $\boldsymbol{\beta}=\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3$, 求方程 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{\beta}$ 的通解.

解 (1) 由于矩阵 $\boldsymbol{A}$ 有三个不同的特征值 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 与对角阵 $\operatorname{diag}\{\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3\}$ 相似, 且对角阵上至多只有一个零元, 所以 $r(\boldsymbol{A})\geqslant 2$. 又 $\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{\alpha}_1+2\boldsymbol{\alpha}_2$ 说明 $\boldsymbol{A}$ 的列向量组线性相关, 故 $r(\boldsymbol{A})\leqslant 2$, 因此 $r(\boldsymbol{A})=2$.

(2) 因为 $r(\boldsymbol{A})=2$, 所以 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系中只有一个线性无关的解向量. 由 $\boldsymbol{\alpha}_3=\boldsymbol{\alpha}_1+2\boldsymbol{\alpha}_2$ 可知 $\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}1\\2\\-1\end{pmatrix}=\boldsymbol{0}$, 即方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{0}$ 的一个解就是 $\begin{pmatrix}1\\2\\-1\end{pmatrix}$. 而 $\boldsymbol{\beta}=\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3$, 则方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{\beta}$ 的一个特解为 $\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}$, 进而方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{\beta}$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=k\begin{pmatrix}1\\2\\-1\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}, k\in\mathbb{R}$.

21.(本题满分 11 分)

设实二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=2x_1^2-x_2^2+ax_3^2+2x_1x_2-8x_1x_3+2x_2x_3$ 在正交变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{Qy}$ 下的标准形为 $\lambda_1y_1^2+\lambda_2y_2^2$, 求 a 的值及一个正交矩阵 $\boldsymbol{Q}$.

解 首先二次型的矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}2&1&-4\\1&-1&1\\-4&1&a\end{pmatrix}$. 由于二次型在正交变换下的标准形为 $\lambda_1y_1^2+\lambda_2y_2^2$, 故 $\boldsymbol{A}$ 一定有零特征值, 所以 $|\boldsymbol{A}|=0$, 解得 $a=2$.

由 $|\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}|=\begin{vmatrix}\lambda-2&-1&4\\-1&\lambda+1&-1\\4&-1&\lambda-2\end{vmatrix}=\lambda(\lambda+3)(\lambda-6)$ 可知 $\boldsymbol{A}$ 的三个特征值为

$\lambda_1=-3,\lambda_2=6,\lambda_3=0.$

解方程组 $(-3\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得特征值 $\lambda_1=-3$ 的一个单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_1=\dfrac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix}1\\-1\\1\end{pmatrix}$.

解方程组 $(6\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得特征值 $\lambda_2=6$ 的一个单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_2=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}-1\\0\\1\end{pmatrix}$.

解方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 得特征值 $\lambda_3=0$ 的一个单位特征向量 $\boldsymbol{\xi}_3=\dfrac{1}{\sqrt{6}}\begin{pmatrix}1\\2\\1\end{pmatrix}$.

因此 $\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{\xi}_1,\boldsymbol{\xi}_2,\boldsymbol{\xi}_3)=\begin{pmatrix}1/\sqrt{3}&-1/\sqrt{2}&1/\sqrt{6}\\-1/\sqrt{3}&0&2/\sqrt{6}\\1/\sqrt{3}&1/\sqrt{2}&1/\sqrt{6}\end{pmatrix}$ 即为所求正交矩阵.

22.(**本题满分 11 分**)

设随机变量 X,Y 相互独立, 且 X 的概率分布为 $P(X=0)=P(X=2)=\dfrac{1}{2}$, Y 的概率密度为 $f(y)=\begin{cases}2y, & 0<y<1\\0, & 其他\end{cases}$.

(1) 求概率 $P(Y\leqslant EY)$;

(2) 求 $Z=X+Y$ 的概率密度.

解 (1) 首先有 $EY=\displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty}yf(y)\mathrm{d}y=\int_0^1 y\cdot 2y\mathrm{d}y=\frac{2}{3}$, 于是

$$P(Y\leqslant EY)=P\left(Y\leqslant\frac{2}{3}\right)=\int_0^{\frac{2}{3}}2y\mathrm{d}y=\frac{4}{9}.$$

(2) Z 的分布函数为

$$\begin{aligned}F_Z(z)&=P(Z\leqslant z)=P(X+Y\leqslant z)\\&=P(Y+X\leqslant z|X=0)P(X=0)+P(Y+X\leqslant z|X=2)P(X=2)\\&=\frac{1}{2}P(Y\leqslant z|X=0)+\frac{1}{2}P(Y+2\leqslant z)\\&=\frac{1}{2}P(Y\leqslant z)+\frac{1}{2}P(Y\leqslant z-2)=\frac{1}{2}F_Y(z)+\frac{1}{2}F_Y(z-2).\end{aligned}$$

因此 Z 的概率密度为 $f_Z(z)=\dfrac{1}{2}f_Y(z)+\dfrac{1}{2}f_Y(z-2)=\begin{cases}z, & 0<z<1\\z-2, & 2<z<3\\0, & 其他\end{cases}$.

23.(本题满分 11 分)

某工程师为了解一台天平的精度, 用该天平对一物体的质量做了 n 次测量, 该物体的质量 μ 是已知的. 设 n 次测量的结果 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 相互独立, 且均服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$. 该工程师记录的是 n 次测量的绝对误差 $Z_i = |X_i - \mu| (i = 1, 2, \cdots, n)$, 利用 $Z_1, Z_2, \cdots, Z_n$ 估计参数 σ.

(1) 求 Z_1 的概率密度;

(2) 利用一阶矩求 σ 的矩估计量;

(3) 求参数 σ 的最大似然估计量.

解 (1) 由 $X_i \sim N(\mu, \sigma^2)$ 可知 $\dfrac{X_i - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1)$. $Z_i = |X_i - \mu| \, (i = 1, 2, \cdots, n)$ 独立同分布, 设 Z_1 的分布函数为 $F(z)$, 则

$$\begin{aligned} F(z) &= P(Z_i \leqslant z) = P(|X_i - \mu| \leqslant z) = P\left(-\frac{z}{\sigma} \leqslant \frac{X_i - \mu}{\sigma} \leqslant \frac{z}{\sigma}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{z}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{z}{\sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{z}{\sigma}\right) - 1. \end{aligned}$$

则 Z_1 的概率密度为

$$f(z) = F'(z) = \begin{cases} \dfrac{2}{\sigma}\varphi\left(\dfrac{2}{\sigma}\right), & z \geqslant 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} = \begin{cases} \dfrac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}, & z \geqslant 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}.$$

其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数, $\varphi(x)$ 为标准正态概率密度.

(2) 设 $\bar{Z}$ 为样本均值, 令

$$\bar{Z} = E(Z_1) = \int_0^{+\infty} \sqrt{\pi}\sigma z \mathrm{e}^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \mathrm{d}z = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma,$$

由此可知 σ 的矩估计量 $\hat{\sigma}_1 = \sqrt{\dfrac{\pi}{2}}\bar{Z}$.

(3) 设 $Z_1, Z_2, \cdots, Z_n$ 对应的样本值为 $z_1, z_2, \cdots, z_n$, 则似然函数为

$$L(\sigma) = \prod_{i=1}^{n} f(z_i) = \begin{cases} \left(\dfrac{2}{\pi}\right)^{\frac{n}{2}} \dfrac{1}{\sigma^n}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2\sigma^2}\sum\limits_{i=1}^{n} z_i^2}, & z_1, z_2, \cdots, z_n > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

当 $z_1, z_2, \cdots, z_n > 0$ 时, 取对数得 $\ln L(\sigma) = \dfrac{n}{2}\ln\dfrac{2}{\pi} - n\ln\sigma - \dfrac{1}{2\sigma^2}\sum\limits_{i=1}^{n} z_i^2$, 令

$$\frac{\mathrm{d}\ln L(\sigma)}{\mathrm{d}\sigma} = -\frac{n}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3}\sum_{i=1}^{n} z_i^2 = 0,$$

解得 $\sigma = \sqrt{\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} z_i^2}$, 故 σ 的最大似然估计量为 $\hat{\sigma}_2 = \sqrt{\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} Z_i^2}$.

13　2018 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 下列函数中, 在 $x=0$ 处不可导的是　(　)

   A. $f(x)=|x|\sin|x|$　　B. $f(x)=|x|\sin\sqrt{|x|}$

   C. $f(x)=\cos|x|$　　D. $f(x)=\cos\sqrt{|x|}$

   解　A, B, C 可直接验证可导, D 根据导数的定义可得 $f'_+(0)=-\dfrac{1}{2}, f'_-(0)=\dfrac{1}{2}$, 选 D.

2. 设函数 $f(x)$ 在 $[0,1]$ 上二阶可导, 且 $\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x=0$, 则　(　)

   A. 当 $f'(x)<0$ 时, $f\left(\dfrac{1}{2}\right)<0$　　B. 当 $f''(x)<0$ 时, $f\left(\dfrac{1}{2}\right)<0$

   C. 当 $f'(x)>0$ 时, $f\left(\dfrac{1}{2}\right)<0$　　D. 当 $f''(x)>0$ 时, $f\left(\dfrac{1}{2}\right)<0$

   解　考虑 $f(x)$ 在 $x=\dfrac{1}{2}$ 处的泰勒展开式:

$$f(x)=f\left(\frac{1}{2}\right)+f'\left(\frac{1}{2}\right)\left(x-\frac{1}{2}\right)+\frac{f''(\xi)}{2}\left(x-\frac{1}{2}\right)^2,$$

   因此当 $f''(x)>0$ 时, $f(x)>f\left(\dfrac{1}{2}\right)+f'\left(\dfrac{1}{2}\right)\left(x-\dfrac{1}{2}\right)$, 不等式两边在 $[0,1]$ 上进行积分可得 $f\left(\dfrac{1}{2}\right)<0$, 选 D.

3. 设 $M=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\dfrac{(1+x)^2}{1+x^2}\mathrm{d}x, N=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\dfrac{1+x}{\mathrm{e}^x}\mathrm{d}x, K=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left(1+\sqrt{\cos x}\right)\mathrm{d}x$, 则　(　)

   A. $M>N>K$　　B. $M>K>N$　　C. $K>M>N$　　D. $N>M>K$

   解　利用对称性可以计算 $M=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\dfrac{(1+x)^2}{1+x^2}\mathrm{d}x=\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left(1+\dfrac{2x}{1+x^2}\right)\mathrm{d}x=\pi$, 另外比较被积函数与 1 的大小关系易见 $K>\pi=M>N$.

4. 设某产品的成本函数 $C(Q)$ 可导, 其中 Q 为产量, 若产量为 Q_0 时平均成本最小, 则 (　)

A. $C'(Q_0)=0$ B. $C'(Q_0)=C(Q_0)$

C. $C'(Q_0)=Q_0C(Q_0)$ D. $Q_0C'(Q_0)=C(Q_0)$

解 平均成本 $\bar{C}=\dfrac{C(Q)}{Q}, \bar{C}'=\dfrac{C'(Q)Q-C(Q)}{Q^2}$. 产量为 Q_0 时平均成本最小, 则 $\bar{C}'(Q_0)=0$, 可得 $Q_0C'(Q_0)=C(Q_0)$, 选 D.

5. 下列矩阵中, 与矩阵 $\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix}$ 相似的为 ( )

A. $\begin{pmatrix}1&1&-1\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix}$ B. $\begin{pmatrix}1&0&-1\\0&1&1\\0&0&1\end{pmatrix}$ C. $\begin{pmatrix}1&1&-1\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$ D. $\begin{pmatrix}1&0&-1\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$

解 易知题中矩阵均有 3 重特征值 1. 若矩阵相似, 则不同特征值对应矩阵 $\lambda\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 的秩相等, 即 $\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A}$ 的秩相等, 选 A.

6. 设 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 为 n 阶矩阵, 记 $r(\boldsymbol{X})$ 为矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的秩, $(\boldsymbol{X}\ \ \boldsymbol{Y})$ 表示分块矩阵, 则 ( )

A. $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{AB})=r(\boldsymbol{A})$ B. $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{BA})=r(\boldsymbol{A})$

C. $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{B})=\max\{r(\boldsymbol{A}),r(\boldsymbol{B})\}$ D. $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{B})=r(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\ \ \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}})$

解 对于 A, 有 $(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{AB})=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{E}\ \ \boldsymbol{B})$, 且 $(\boldsymbol{E}\ \ \boldsymbol{B})$ 为行满秩的矩阵, 则 $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{AB})=r(\boldsymbol{A})$, 即选 A. B 错误, 反例取 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&0\\0&0\end{pmatrix}, \boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}1&0\\1&1\end{pmatrix}$. C 错误, $r(\boldsymbol{A}\ \ \boldsymbol{B})\geqslant\max\{r(\boldsymbol{A}),r(\boldsymbol{B})\}$, 反例取 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&0\\0&0\end{pmatrix}, \boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}0&0\\0&1\end{pmatrix}$. D 错误, 反例取 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&0\\0&0\end{pmatrix}, \boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}0&0\\1&0\end{pmatrix}$.

7. 设随机变量 X 的概率密度 $f(x)$ 满足 $f(1+x)=f(1-x)$, 且 $\int_0^2 f(x)\mathrm{d}x=0.6$, 则 $P(X<0)=$ ( )

A. 0.2 B. 0.3 C. 0.4 D. 0.6

解 由 $f(1+x)=f(1-x)$ 知 $f(x)$ 关于 $x=1$ 对称, 则

$$\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x=\int_1^2 f(x)\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\int_0^2 f(x)\mathrm{d}x=0.3,$$

于是 $P\{X<0\}=\int_{-\infty}^0 f(x)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^1 f(x)\mathrm{d}x-\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x=0.5-0.3=0.2$, 选 A.

8. 设 $X_1,X_2,\cdots,X_n\ (n\geqslant 2)$ 为来自总体 $X\sim N\left(\mu,\sigma^2\right)(\sigma>0)$ 的简单随机样本, 令

$$\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_i, S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n\left(X_i-\bar{X}\right)^2}, S^*=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(X_i-\mu)^2},$$

则 ( )

A. $\dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{S} \sim t\left(n\right)$ B. $\dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{S} \sim t\left(n-1\right)$

C. $\dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{S^*} \sim t\left(n\right)$ D. $\dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{S^*} \sim t\left(n-1\right)$

解 首先由 $X \sim N\left(\mu,\sigma^2\right)$ 可知 $\bar{X} \sim N\left(\mu,\dfrac{\sigma^2}{n}\right) \Rightarrow \dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{\sigma} \sim N\left(0,1\right)$. 而样本方差 $S^2 = \dfrac{1}{n-1}\sum\limits_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2$ 满足的分布为 $\dfrac{(n-1)}{\sigma^2}S^2 \sim \chi^2\left(n-1\right)$, 且样本均值与样本方差独立, 根据 t 分布的定义知 $\dfrac{\frac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{\sigma}}{\sqrt{\frac{\frac{(n-1)}{\sigma^2}S^2}{n-1}}} = \dfrac{\sqrt{n}\left(\bar{X}-\mu\right)}{S} \sim t\left(n-1\right)$, 选 B.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 曲线 $y = x^2 + 2\ln x$ 在其拐点处的切线方程是 ________.

解 计算可得 $y' = 2x + \dfrac{2}{x}, y'' = 2 - \dfrac{2}{x^2}$, 由此得曲线的拐点坐标 $(1,1)$. 曲线在拐点处切线的斜率为 $y'\big|_{x=1} = 4$, 故切线方程为 $y = 4x-3$.

10. $\displaystyle\int \mathrm{e}^x \arcsin\sqrt{1-\mathrm{e}^{2x}}\mathrm{d}x =$ ________.

解 令 $\arcsin\sqrt{1-\mathrm{e}^{2x}} = t$, 则 $\mathrm{e}^x = \cos t, \mathrm{d}x = -\dfrac{\sin t}{\cos t}\mathrm{d}u$, 原积分化为

$$-\int t\cos t\frac{\sin t}{\cos t}\mathrm{d}t = -\int t\sin t\mathrm{d}t = t\cos t - \int \cos t\mathrm{d}t = t\cos t - \sin t + C,$$

带回原变量得原不定积分为 $\mathrm{e}^x\arcsin\sqrt{1-\mathrm{e}^{2x}} - \sqrt{1-\mathrm{e}^{2x}} + C$.

11. 差分方程 $\Delta^2 y_x - y_x = 5$ 的通解是 ________.

解 根据二阶差分的定义可得

$$\Delta^2 y_x = \Delta y_{x+1} - \Delta y_x = (y_{x+2}-y_{x+1}) - (y_{x+1}-y_x) = y_{x+2} - 2y_{x+1} + y_x,$$

由 $\Delta^2 y_x - y_x = 5$ 得 $y_{x+2} - 2y_{x+1} = 5$. 先求齐次方程的通解, 齐次差分方程的特征方程 $\lambda - 2 = 0$, 齐次方程通解为 $Y = C\cdot 2^x$. 由于 1 不是特征根, 于是假设原差分方程的特解为 $y_x^* = A$, 带入非齐次方程知特解为 $y_x^* = -5$, 于是原方程的通解为 $y_x = C\cdot 2^x - 5$.

12. 设函数 $f(x)$ 满足 $f(x+\Delta x) - f(x) = 2xf(x)\Delta x + o(\Delta x)(\Delta x \to 0)$, 且 $f(0) = 2$, 则 $f(1) =$ ________.

解 在等式 $f(x+\Delta x) - f(x) = 2xf(x)\Delta x + o(\Delta x)$ 两边除以 Δx, 并令 $\Delta x \to 0$ 得 $f'(x) = 2xf(x)$, 解得 $f(x) = C\mathrm{e}^{x^2}$. 由 $f(0) = 2$ 得 $C = 2$, 于是 $f(1) = 2\mathrm{e}$.

13.设 $\boldsymbol{A}$ 为三阶矩阵,$\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 为线性无关的向量组. 若 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_1=2\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_2=\boldsymbol{\alpha}_2+2\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}_3=-\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3$, 则 A 的实特征值为 ________.

解 由题意得 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)\begin{pmatrix}2&0&0\\1&1&-1\\1&2&1\end{pmatrix}$. 由于向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性无关, 记 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3),\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}2&0&0\\1&1&-1\\1&2&1\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}$ 是可逆矩阵, 因此矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与矩阵 $\boldsymbol{B}$ 相似, 它们有相同的特征值, 易求得 $\boldsymbol{B}$ 的实特征值为 2, 即 $\boldsymbol{A}$ 的实特征值为 2.

14.随机事件 A,B,C 相互独立, 且 $P(A)=P(B)=P(C)=\dfrac{1}{2}$, 则 $P(AC|A\cup B)=$____.

解 直接计算得 $P(AC|A\cup B)=\dfrac{P[(AC)\cup(ABC)]}{P(A\cup B)}=\dfrac{P(AC)}{P(A)+P(B)-P(AB)}=\dfrac{1}{3}$.

三 解答题, 15 ~ 23 题, 共 94 分.

15.(**本题满分 10 分**)

已知实数 a,b 满足 $\lim\limits_{x\to+\infty}\left[(ax+b)\mathrm{e}^{\frac{1}{x}}-x\right]=2$, 求 a,b.

解 直接利用泰勒公式得

$$\begin{aligned}\lim_{x\to+\infty}\left[(ax+b)\mathrm{e}^{\frac{1}{x}}-x\right]&=\lim_{x\to+\infty}\left[(ax+b)\left(1+\frac{1}{x}+o\left(\frac{1}{x}\right)\right)-x\right]\\&=\lim_{x\to+\infty}\left[(a-1)x+a+b+\frac{b}{x}+(ax+b)o\left(\frac{1}{x}\right)\right]\\&=2\end{aligned}$$

由于 $\lim\limits_{x\to+\infty}\dfrac{b}{x}=0,\ \lim\limits_{x\to+\infty}(ax+b)o\left(\dfrac{1}{x}\right)=0$, 所以 $\begin{cases}a-1=0\\a+b=2\end{cases}$, 解得 $a=b=1$.

16.(**本题满分 10 分**)

设平面区域 D 由曲线 $y=\sqrt{3(1-x^2)}$ 与直线 $y=\sqrt{3}x$ 及 y 轴围成, 计算二重积分 $\iint\limits_D x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y$.

解 直接化成累次积分计算可得

$$\begin{aligned}\iint\limits_D x^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y&=\int_0^{\frac{\sqrt{2}}{2}}x^2\mathrm{d}x\int_{\sqrt{3}x}^{\sqrt{3(1-x^2)}}\mathrm{d}y\\&=\int_0^{\frac{\sqrt{2}}{2}}x^2\left(\sqrt{3(1-x^2)}-\sqrt{3}x\right)\mathrm{d}x\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= \int_0^{\frac{\sqrt{2}}{2}} x^2\sqrt{3\left(1-x^2\right)}\mathrm{d}x - \sqrt{3}\int_0^{\frac{\sqrt{2}}{2}} x^3\mathrm{d}x \\
&= \frac{\sqrt{3}}{32}\pi - \frac{\sqrt{3}}{16}.
\end{aligned}
$$

17.(本题满分 10 分)

[1]将长为 2 m 的铁丝分成三段, 依次围成圆、正方形与正三角形, 三个图形的面积之和是否存在最小值? 若存在, 求出最小值.

解 设分成的三段依次为 x, y, z, 则 $x+y+z=2$, 依次围成的圆的半径、正方形的边长与正三角形边长分别为 $\frac{x}{2\pi}, \frac{y}{4}, \frac{z}{3}$, 因此三个面积的和为

$$S = \pi\left(\frac{x}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{y}{4}\right)^2 + \frac{\sqrt{3}}{4}\left(\frac{z}{3}\right)^2 = \frac{x^2}{4\pi} + \frac{1}{16}y^2 + \frac{\sqrt{3}}{36}z^2.$$

方法一 令 $f(x, y, z, \lambda) = \frac{x^2}{4\pi} + \frac{1}{16}y^2 + \frac{\sqrt{3}}{36}z^2 + \lambda(x+y+z-2)$, 首先求驻点. 由方程 $\begin{cases} f_x' = \frac{x}{2\pi} + \lambda = 0 \\ f_y' = \frac{y}{8} + \lambda = 0 \\ f_z' = \frac{\sqrt{3}}{18}z + \lambda = 0 \\ x+y+z=2 \end{cases}$ 可得 $\begin{cases} x = \frac{2\pi}{\pi+4+3\sqrt{3}} \\ y = \frac{8}{\pi+4+3\sqrt{3}} \\ z = \frac{6\sqrt{3}}{\pi+4+3\sqrt{3}} \end{cases}$, 并且黑塞矩阵 $Hf = \operatorname{diag}\left\{\frac{1}{2\pi}, \frac{1}{8}, \frac{\sqrt{3}}{18}\right\}$ 正定, 这就是面积和的最小值点, 此时最小面积为 $S_{\min} = \frac{1}{\pi+4+3\sqrt{3}}\mathrm{m}^2$.

方法二 由柯西不等式 $\left(\frac{x^2}{4\pi} + \frac{1}{16}y^2 + \frac{\sqrt{3}}{36}z^2\right)\left(4\pi + 16 + \frac{36}{\sqrt{3}}\right) \geqslant (x+y+z)^2 = 4$,

因此当 $\frac{x}{2\pi} = \frac{y}{16} = \frac{z}{12\sqrt{3}}$ 即 $\begin{cases} x = \frac{2\pi}{\pi+4+3\sqrt{3}} \\ y = \frac{8}{\pi+4+3\sqrt{3}} \\ z = \frac{6\sqrt{3}}{\pi+4+3\sqrt{3}} \end{cases}$ 时, $S_{\min} = \frac{1}{\pi+4+3\sqrt{3}}\mathrm{m}^2$.

18.(本题满分 10 分)

已知 $\cos 2x - \frac{1}{(1+x)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n (-1 < x < 1)$, 求 a_n.

解 首先 $\left(\frac{1}{2}\sin 2x + \frac{1}{1+x}\right)' = \cos 2x - \frac{1}{(1+x)^2}$, 而当 $-1 < x < 1$ 时,

$$\sin 2x = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{1}{(2n+1)!}(2x)^{2n+1}, \quad \frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n x^n$$

[1]此题来自裴礼文数学分析中的典型例题与方法 697 页.

. 求导得

$$\cos 2x-\frac{1}{(1+x)^2}=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{(2n)!}4^n x^{2n}+\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^{n+1}(n+1)x^n.$$

比较系数可得 $a_n=\begin{cases}2k+2, & n=2k+1\\ \dfrac{(-4)^k}{(2k)!}-(2k+1), & n=2k\end{cases}\ (k\in\mathbb{N})$.

19.(**本题满分** 10 **分**)

设数列 $\{x_n\}$ 满足 $x_1>0, x_n e^{x_{n+1}}=e^{x_n}-1\ (n=1,2,\cdots)$. 证明 $\{x_n\}$ 收敛并求 $\lim\limits_{n\to\infty}x_n$.

解 首先由 $x_1>0, x_n e^{x_{n+1}}=e^{x_n}-1\ (n=1,2,\cdots)$ 归纳可知所有 $x_n>0$. 考虑函数 $f(x)=e^x$, 由拉格朗日中值定理有

$$e^{x_{n+1}}=\frac{e^{x_n}-1}{x_n}=\frac{f(x_n)-f(0)}{x_n-0}=e^{\xi_n}<e^{x_n},\ \ \xi_n\in(0,x_n).$$

这就说明 $x_n>x_{n+1}>0$, 因此 $\{x_n\}$ 单调递减有下界, 故收敛. 设 $\lim\limits_{n\to\infty}x_n=x\geqslant 0$, 在等式 $x_n e^{x_{n+1}}=e^{x_n}-1$ 两边取极限得 $xe^x=e^x-1$. 如果 $x>0$, 则 $e^x=\dfrac{e^x-1}{x}<e^x$, 矛盾, 因此 $\lim\limits_{n\to\infty}x_n=x=0$.

20.(**本题满分** 11 **分**)

设实二次型 $f(x_1,x_2,x_3)=(x_1-x_2+x_3)^2+(x_2+x_3)^2+(x_1+ax_3)^2$, 其中 a 是参数.

(1) 求 $f(x_1,x_2,x_3)=0$ 的解;

(2) 求 $f(x_1,x_2,x_3)$ 的规范形.

解 (1) 由 $f(x_1,x_2,x_3)=0$ 可得方程组 $\begin{cases}x_1-x_2+x_3=0\\ x_2+x_3=0\\ x_1+ax_3=0\end{cases}$. 对其系数矩阵进行初等行变换得

$$\begin{pmatrix}1&-1&1\\0&1&1\\1&0&a\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&-1&1\\0&1&1\\0&0&a-2\end{pmatrix}.$$

如果 $a=2$, 则方程组的通解为 $(x_1,x_2,x_3)^{\mathrm{T}}=c(-2,-1,1)^{\mathrm{T}}$. 如果 $a\neq 2$, 则方程组只有零解 $(x_1,x_2,x_3)^{\mathrm{T}}=(0,0,0)^{\mathrm{T}}$.

(2) 如果 $a\neq 2$, 令

$$\begin{pmatrix}y_1\\y_2\\y_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&-1&1\\0&1&1\\1&0&a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{pmatrix}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}.$$

其中 $\boldsymbol{Q}$ 是可逆矩阵, 所以此时的规范形为 $f(y_1,y_2,y_3)=y_1^2+y_2^2+y_3^2$.

如果 $a=2$, 配方得

$$\begin{aligned}f\left(x_1,x_2,x_3\right)&=\left(x_1-x_2+x_3\right)^2+\left(x_2+x_3\right)^2+\left(x_1+2x_3\right)^2\\&=2x_1^2+2x_2^2+6x_3^2-2x_1x_2+6x_1x_3\\&=2\left(x_1-\frac{1}{2}x_2+\frac{3}{2}x_3\right)^2+\frac{3}{2}\left(x_2+x_3\right)^2.\end{aligned}$$

此时的规范形为 $f(y_1,y_2,y_3)=y_1^2+y_2^2$.

21.(本题满分 11 分)

已知 a 是常数, 且矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&2&a\\1&3&0\\2&7&-a\end{pmatrix}$ 可经初等列变换化为矩阵 $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}1&a&2\\0&1&1\\-1&1&1\end{pmatrix}$.

(1) 求 a;

(2) 求满足 $\boldsymbol{AP}=\boldsymbol{B}$ 的可逆矩阵 $\boldsymbol{P}$.

解 (1) 由于矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可经过初等列变换化为矩阵 $\boldsymbol{B}$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的列向量组等价. 则对增广矩阵做初等行变换得

$$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\begin{pmatrix}1&2&a&1&a&2\\1&3&0&0&1&1\\2&7&-a&-1&1&1\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1&2&a&1&a&2\\0&1&-a&-1&1-a&-1\\0&0&0&0&a-2&0\end{pmatrix}.$$

因此 $a=2$.

(2) 问题等价于解矩阵方程 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{B}$, 也就是解三个非齐次线性方程组. 由 (1) 可得

$$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})\to\begin{pmatrix}1&0&6&3&4&4\\0&1&-2&-1&-1&-1\\0&0&0&0&0&0\end{pmatrix}$$

解得 $\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}-6k_1+3&-6k_2+4&-6k_3+4\\2k_1-1&2k_2-1&2k_3-1\\k_1&k_2&k_3\end{pmatrix}$, k_1,k_2,k_3 为任意常数. 注意到 $\boldsymbol{P}$ 是可逆矩阵, 因此 $|\boldsymbol{P}|\neq 0$, 这要求 $k_2\neq k_3$.

22.(本题满分 11 分)

已知随机变量 X 与 Y 相互独立, X 的概率分布为 $P\{X=1\}=P\{X=-1\}=\dfrac{1}{2}$, Y 服从参数为 λ 的泊松分布, 令 $Z=XY$.

(1) 求 $\operatorname{Cov}(X,Z)$;

(2) 求 Z 的概率分布.

解 (1) 直接计算可知 $E(X)=0, E(X^2)=1$, 而 $Y\sim P(\lambda), E(Y)=\lambda$, 因此

$$\begin{aligned}\operatorname{Cov}(X,Z)&=\operatorname{Cov}(X,XY)=E(X^2Y)-E(X)E(XY)\\&=E(X^2)E(Y)-(EX)^2E(Y)=\lambda.\end{aligned}$$

(2) 首先有

$$\begin{aligned}P(Z=k)&=P(X=1)P(Z=k|X=1)+P(X=-1)P(Z=k|X=-1)\\&=P(X=1)P(Y=k)+P(X=-1)P(Y=-k)\\&=\frac{1}{2}P(Y=k)+\frac{1}{2}P(Y=-k).\end{aligned}$$

当 $k=1,2,3,\cdots$ 时, $P\{Z=k\}=\frac{1}{2}P\{Y=k\}=\frac{\lambda^k\mathrm{e}^{-\lambda}}{2k!}$;
当 $k=0$ 时, $P(Z=0)=P(Y=0)=\mathrm{e}^{-\lambda}$;
当 $k=-1,-2,-3,\cdots$ 时, $P\{Z=k\}=\frac{1}{2}P\{Y=-k\}=\frac{\lambda^{-k}\mathrm{e}^{-\lambda}}{2(-k)!}$.
因此综上所述可得

$$P(Z=k)=\begin{cases}\dfrac{\lambda^{|k|}\mathrm{e}^{-\lambda}}{2|k|!}, & k=\pm1,\pm2,\cdots\\ \mathrm{e}^{-\lambda}, & k=0\end{cases}.$$

23.(**本题满分 11 分**)

设总体 X 的概率密度为

$$f(x;\sigma)=\frac{1}{2\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{|x|}{\sigma}},-\infty<x<+\infty,$$

其中 $\sigma\in(0,+\infty)$ 为未知参数, $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为来自总体 X 的简单随机样本, 记 σ 的最大似然估计量为 $\hat{\sigma}$.

(1) 求 $\hat{\sigma}$;

(2) 求 $E(\hat{\sigma}), D(\hat{\sigma})$.

解 (1) 设 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 对应的样本值为 $x_1,x_2,\cdots,x_n$, 则似然函数为

$$L(\sigma)=\prod_{i=1}^{n}f(x_i;\sigma)=2^{-n}\sigma^{-n}\mathrm{e}^{-\frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i|}{\sigma}},$$

取对数得 $\ln L(\sigma)=-n\ln 2-n\ln\sigma-\frac{1}{\sigma}\sum_{i=1}^{n}|x_i|$. 令 $\frac{\mathrm{d}\ln L}{\mathrm{d}\sigma}=\frac{-n}{\sigma}+\frac{1}{\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}|x_i|=0$,
解得 $\sigma=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i|$, 因此 σ 的最大似然估计量为 $\hat{\sigma}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|X_i|$.

(2) 因为 $E\left(|X|\right)=\int_{-\infty}^{+\infty}|x|\,f\left(x\right)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|x|}{2\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{|x|}{\sigma}}\mathrm{d}x=\sigma$, 所以

$$E\left(\hat{\sigma}\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}E\left|X_i\right|=E\left(|X|\right)=\sigma,$$

$$E(X^2)=\int_{-\infty}^{+\infty}x^2f\left(x\right)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x^2}{2\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{|x|}{\sigma}}\mathrm{d}x=2\sigma^2,$$

$$D\left(\hat{\sigma}\right)=\frac{D\left(|X|\right)}{n}=\frac{1}{n}\left(E(X^2)-(E|X|)^2\right)=\frac{\sigma^2}{n}.$$

14　2019 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 当 $x \to 0$ 时, $x - \tan x$ 与 x^k 是同阶无穷小, 则 $k =$ (　　)

A. 1　　B. 2　　C. 3　　D. 4

解　当 $x \to 0$ 时, $x - \tan x \sim -\dfrac{1}{3}x^3$, 因此选 C.

2. 已知方程 $x^5 - 5x + k = 0$ 有 3 个不同的实根, 则 k 的取值范围是 (　　)

A. $(-\infty, -4)$　　B. $(4, +\infty)$　　C. $\{-4, 4\}$　　D. $(-4, 4)$

解　令 $f(x) = x^5 - 5x + k$, 则 $f'(x) = 5x^4 - 5$, 由 $f'(x) = 0$ 可得 $x = \pm 1$. 当 $-1 < x < 1$ 时, $f'(x) < 0$;当 $x < -1$ 或 $x > 1$ 时, $f'(x) > 0$. 因此有极大值 $f(-1) = 4 + k$, 极小值 $f(1) = k - 4$, 且 $\lim\limits_{x \to -\infty} f(x) = -\infty$, $\lim\limits_{x \to +\infty} f(x) = +\infty$. 要想原方程有 3 个不同的实根, 则有 $f(-1) > 0$, $f(1) < 0$, 解得 $-4 < k < 4$, 选 D.

3. 已知微分方程 $y'' + ay' + by = c\mathrm{e}^x$ 的通解为 $y = (C_1 + C_2 x)\mathrm{e}^{-x} + \mathrm{e}^x$, 则 a, b, c 依次为 (　　)

A. $1, 0, 1$　　B. $1, 0, 2$　　C. $2, 1, 3$　　D. $2, 1, 4$

解　从通解的结构可知, $Y = (C_1 + C_2 x)\mathrm{e}^{-x}$ 是对应齐次方程的通解, 因此 $\lambda = -1$ 是特征方程的二重特征根, 因此 $a = 2, b = 1$. 而 $y^* = \mathrm{e}^x$ 是非齐次方程的特解, 将此特解代入方程 $y'' + 2y' + y = c\mathrm{e}^x$ 可得 $c = 4$, 选 D.

4. 若 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} n u_n$ 绝对收敛, $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{v_n}{n}$ 条件收敛, 则 (　　)

A. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n v_n$ 条件收敛　　B. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n v_n$ 绝对收敛

C. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} (u_n + v_n)$ 收敛　　D. $\sum\limits_{n=1}^{\infty} (u_n + v_n)$ 发散

解　由于 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \dfrac{v_n}{n}$ 条件收敛, 故它的通项趋于零, 则存在 $M > 0$ 使得 $\left|\dfrac{v_n}{n}\right| \leqslant M$, 因此 $|u_n v_n| = \left|n u_n \cdot \dfrac{v_n}{n}\right| \leqslant M |n u_n|$. 由于 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} n u_n$ 绝对收敛, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty} u_n v_n$ 绝对收敛,

选 B. 对于 A 和 C 选项, 可取反例 $u_n = \frac{1}{n^3}, v_n = (-1)^n$;对于 D 选项, 可取反例 $u_n = \frac{1}{n^3}, v_n = \frac{(-1)^n}{\ln(n+1)}$.

5. 设 $\boldsymbol{A}$ 是四阶矩阵, $\boldsymbol{A}^*$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的伴随矩阵, 若线性方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0}$ 的基础解系中只有两个向量, 则 $r(\boldsymbol{A}^*) =$ ( )

A. 0 B. 1 C. 2 D. 3

解 由于方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{0}$ 的基础解系中只有两个向量, 故 $r(\boldsymbol{A}) = 2$, 因此 $r(\boldsymbol{A}^*) = 0$

6. 设 $\boldsymbol{A}$ 是 3 阶实对称矩阵, $\boldsymbol{E}$ 是 3 阶单位矩阵, 若 $\boldsymbol{A}^2 + \boldsymbol{A} = 2\boldsymbol{E}$, 且 $|\boldsymbol{A}| = 4$, 则二次型 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$ 的规范形为 ( )

A. $y_1^2 + y_2^2 + y_3^2$ B. $y_1^2 + y_2^2 - y_3^2$ C. $y_1^2 - y_2^2 - y_3^2$ D. $-y_1^2 - y_2^2 - y_3^2$

解 由 $\boldsymbol{A}^2 + \boldsymbol{A} = 2\boldsymbol{E}$ 可知矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的特征值 λ 满足 $\lambda^2 + \lambda = 2$, 因此 $\lambda = 1$ 或 -2. 再由 $|\boldsymbol{A}| = 4$ 可知 $\boldsymbol{A}$ 的特征值为 $-2, -2, 1$. 因此二次型 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$ 的正惯性指数为 1, 负惯性指数为 2, 选 C.

7. 设 A, B 为随机事件, 则 $P(A) = P(B)$ 的充分必要条件是 ( )

A. $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ B. $P(AB) = P(A)P(B)$

C. $P(A\bar{B}) = P(B\bar{A})$ D. $P(AB) = P(\bar{A}\bar{B})$

解 显然 $P(A) = P(B)$ 等价于 $P(A) - P(AB) = P(B) - P(AB)$, 即 $P(A\bar{B}) = P(B\bar{A})$, 选 C. 对于选项 A 和 D, 取 $A = B = \Omega$ 可排除;对于选项 B, 取 $B = \bar{A}$ 即可排除.

8. 设随机变量 X 与 Y 相互独立, 且都服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 则 $P\{|X - Y| < 1\}$ ( )

A. 与 μ 无关, 而与 σ^2 有关 B. 与 μ 有关, 而与 σ^2 无关

C. 与 μ, σ^2 都有关 D. 与 μ, σ^2 都无关

解 由条件可知 $X - Y \sim N(0, 2\sigma^2)$, 因此

$$\begin{aligned} P\{|X - Y| < 1\} &= P\left\{\left|\frac{X - Y}{\sqrt{2}\sigma}\right| < \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right\} \\ &= \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) - 1, \end{aligned}$$

此概率与 μ 无关, 与 σ^2 有关, 选 A.

二 填空题, 9 ~ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. $\lim\limits_{n\to\infty}\left(\frac{1}{1\cdot 2} + \frac{1}{2\cdot 3} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)}\right)^n =$________.

解 首先 $\sum\limits_{k=1}^{n}\frac{1}{k(k+1)} = \sum\limits_{k=1}^{n}\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k+1}\right) = 1 - \frac{1}{n+1}$, 因此原极限 $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)^n = \mathrm{e}^{\lim\limits_{n\to\infty} n\ln\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)} = \mathrm{e}^{-1}$.

10.曲线 $y=x\sin x+2\cos x\left(-\dfrac{\pi}{2}<x<\dfrac{3\pi}{2}\right)$ 的拐点坐标为________.

解 先求二阶导数

$$y'=\sin x+x\cos x-2\sin x,\ y''=\cos x+\cos x-x\sin x-2\cos x=-x\sin x,$$

令 $y''=0$ 可得 $x=0$ 或 $x=\pi$. 当 $-\dfrac{\pi}{2}<x<0$ 或 $0<x<\pi$ 时 $y''<0$, 当 $\pi<x<\dfrac{3}{2}\pi$ 时 $y''>0$. 因此 $(0,2)$ 不是拐点, $(\pi,-2)$ 是拐点, 选 C.

11.已知 $f(x)=\displaystyle\int_1^x\sqrt{1+t^4}\mathrm{d}t$, 则 $\displaystyle\int_0^1 x^2f(x)\mathrm{d}x=$________.

解 利用二重积分交换次序得

$$\begin{aligned}\int_0^1 x^2f(x)\,\mathrm{d}x&=-\int_0^1 x^2\mathrm{d}x\int_x^1\sqrt{1+t^4}\mathrm{d}t=-\int_0^1\sqrt{1+t^4}\mathrm{d}t\int_0^t x^2\mathrm{d}x\\&=-\frac{1}{3}\int_0^1 t^3\sqrt{1+t^4}\mathrm{d}t=-\frac{1}{18}(1+t)^{\frac{3}{2}}\Big|_0^1=\frac{1-2\sqrt{2}}{18}.\end{aligned}$$

12.以 P_A,P_B 分别表示 A,B 两个商品的价格, 设商品 A 的需求函数 $Q_A=500-P_A^2-P_AP_B+2P_B^2$, 则当 $P_A=10,P_B=20$ 时, 商品 A 的需求量对自身价格的弹性 $\eta_{AA}(\eta_{AA}>0)$ 为________.

解 由需求弹性公式可得

$$\begin{aligned}\eta_{AA}&=\left|\frac{P_A}{P_B}\frac{\partial Q_A}{\partial P_A}\right|=\left|\frac{P_A}{500-P_A^2-P_AP_B+2P_B^2}(-2P_A-P_B)\right|\\&=\frac{P_A(2P_A+P_B)}{500-P_A^2-P_AP_B+2P_B^2},\end{aligned}$$

代入 $P_A=10$, $P_B=20$ 得 $\eta_{AA}=0.4$.

13.已知矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&0&-1\\1&1&-1\\0&1&a^2-1\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{b}=\begin{pmatrix}0\\1\\a\end{pmatrix}$, 若线性方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{b}$ 有无穷多解, 则 $a=$________.

解 对增广矩阵作初等行变换得

$$(\boldsymbol{A},\boldsymbol{b})=\begin{pmatrix}1&0&-1&0\\1&1&-1&1\\0&1&a^2-1&a\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&-1&0\\0&1&0&1\\0&0&a^2-1&a-1\end{pmatrix},$$

因此当 $a=1$ 时, $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{A},\boldsymbol{b})=2<3$, 方程组 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{b}$ 有无穷多解.

14.设随机变量 X 的概率密度为 $f(x)=\begin{cases}\dfrac{x}{2}, & 0<x<2\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$, $F(x)$ 为 X 的分布函数, $E(X)$ 为 X 的数学期望, 则 $P\big(F(X)>E(X)-1\big)=$________.

解 首先 $E(X)=\int_0^2 x\frac{x}{2}\mathrm{d}x=\frac{4}{3}$. 再令 $Y=F(X)$, 则当 $y\leqslant 0$ 时, $P(Y\leqslant y)=0$; 当 $y\geqslant 1$ 时, $P(Y\leqslant y)=1$ (注意分布函数 $F(X)$ 的取值范围). 当 $0<y<1$ 时,

$$P(Y\leqslant y)=P\big(F(X)\leqslant y\big)=P\big(X\leqslant F^{-1}(y)\big)=F\big(F^{-1}(y)\big)=y.$$

因此 $Y=F(X)\sim U(0,1)$, $P\big(F(X)>E(X)-1\big)=P\left(Y>\frac{1}{3}\right)=\frac{2}{3}$.

提示: 事实上我们在这里证明了一个很重要的结论: 如果 X 是一个连续型随机变量, $F(x)$ 是它的分布函数, 则随机变量 $Y=F(X)\sim U(0,1)$.

三 解答题, 15 ～ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

已知函数 $f(x)=\begin{cases}x^{2x}, & x>0\\ xe^x+1, & x\leqslant 0\end{cases}$, 求 $f'(x)$, 并求 $f(x)$ 的极值.

解 首先有 $\lim\limits_{x\to 0^+}x^{2x}=\lim\limits_{x\to 0^+}\mathrm{e}^{x\ln x}=1=f(0)=\lim\limits_{x\to 0^-}(x\mathrm{e}^x+1)$, 因此 $f(x)$ 在 $x=0$ 处连续. 当 $x>0$ 时, $f'(x)=\mathrm{e}^{2x\ln x}(2\ln x+2)$; 当 $x<0$ 时, $f'(x)=(x+1)\mathrm{e}^x$. 而在 $x=0$ 处,

$$\lim_{x\to 0^+}\frac{f(x)-f(0)}{x}=\lim_{x\to 0^+}\frac{x^{2x}-1}{x}=\lim_{x\to 0^+}\frac{\mathrm{e}^{2x\ln x}-1}{x}=\lim_{x\to 0^+}\frac{2x\ln x}{x}=-\infty,$$

因此 $f(x)$ 在 $x=0$ 处不可导, 于是 $f'(x)=\begin{cases}x^{2x}(2+2\ln x), & x>0\\ \text{不存在}, & x=0\\ (x+1)\mathrm{e}^x, & x<0\end{cases}$. 当 $x<-1$ 或 $0<x<\frac{1}{\mathrm{e}}$ 时 $f'(x)<0$, 当 $-1<x<0$ 或 $x>\frac{1}{\mathrm{e}}$ 时, $f'(x)>0$. 由单调性可知 $f\left(\frac{1}{\mathrm{e}}\right)=\left(\frac{1}{\mathrm{e}}\right)^{\frac{2}{\mathrm{e}}}$ 和 $f(-1)=1-\frac{1}{\mathrm{e}}$ 是极小值, $f(0)=1$ 是极大值.

16.(本题满分 10 分)

已知 $f(u,v)$ 具有二阶连续偏导数, 且 $g(x,y)=xy-f(x+y,x-y)$, 求 $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 g}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 g}{\partial y^2}$.

解 直接计算可得

$$\frac{\partial g}{\partial x}=y-f_1'-f_2',\ \frac{\partial g}{\partial y}=x-f_1'+f_2',$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}=-f_{11}''-f_{12}''-f_{21}''-f_{22}''=-f_{11}''-2f_{12}''-f_{22}'',$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} = 1 - f_{11}'' + f_{12}'' - f_{21}'' + f_{22}'' = 1 - f_{11}'' + f_{22}'',$$
$$\frac{\partial^2 g}{\partial y^2} = -f_{11}'' + f_{12}'' + f_{21}'' - f_{22}'' = -f_{11}'' + 2f_{12}'' - f_{22}''.$$

代入即可得 $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} = 1 - 3f_{11}''(x+y, x-y) - f_{22}''(x+y, x-y)$.

17.(**本题满分** 10 **分**)

设 $y(x)$ 是微分方程 $y' - xy = \frac{1}{2\sqrt{x}} e^{\frac{x^2}{2}}$ 满足条件 $y(1) = \sqrt{e}$ 的特解.

(1) 求 $y(x)$;

(2) 设平面区域 $D = \{(x, y) | 1 \leqslant x \leqslant 2, 0 \leqslant y \leqslant y(x)\}$, 求 D 绕 x 旋转一周所得旋转体的体积.

解 (1) 由条件可得 $\left(e^{-\frac{x^2}{2}} y\right)' = e^{-\frac{x^2}{2}}\left(y' - xy\right) = \frac{1}{2\sqrt{x}}$, 于是 $e^{-\frac{x^2}{2}} y = \sqrt{x} + C$. 再由 $y(1) = \sqrt{e}$ 可知 $C = 0$, 因此 $y = \sqrt{x} e^{\frac{x^2}{2}}$.

(2) 所求旋转体的体积为

$$V = \pi \int_1^2 \left(\sqrt{x} e^{\frac{x^2}{2}}\right)^2 dx = \pi \int_1^2 x e^{x^2} dx = \frac{\pi}{2}\left(e^4 - e\right).$$

18.(**本题满分** 10 **分**)

[1]求曲线 $y = e^{-x} \sin x (x \geqslant 0)$ 与 x 轴之间图形的面积.

解 利用直角坐标系下的面积公式可得所求面积为

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{+\infty} e^{-x} |\sin x| \, dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} e^{-x} |\sin x| \, dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\pi} e^{-(n\pi + t)} |\sin(n\pi + t)| \, dt \\ &= \int_0^{\pi} e^{-t} \sin t \, dt \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\pi} \\ &= \frac{1 + e^{-\pi}}{2} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\pi}} = \frac{e^{\pi} + 1}{2\left(e^{\pi} - 1\right)}. \end{aligned}$$

其中利用两次分部积分可得 $\int_0^{\pi} e^{-t} \sin t \, dt = \frac{1 + e^{-\pi}}{2}$.

19.(**本题满分** 10 **分**)

设 $a_n = \int_0^1 x^n \sqrt{1 - x^2} dx (n = 0, 1, 2, \cdots)$.

(1) 证明: 数列 $\{a_n\}$ 单调减少, 且 $a_n = \frac{n-1}{n+2} a_{n-2} (n = 2, 3, \cdots)$;

[1]此题源自2012 年第四届全国大学生数学竞赛非数类考题

(2) 求 $\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{a_n}{a_{n-1}}$.

解 (1) 当 $0<x<1$ 时, $x^n\sqrt{1-x^2}>x^{n+1}\sqrt{1-x^2}$, 因此由 $\{a_n\}$ 的定义可知 $a_n>a_{n+1}$, 即数列 $\{a_n\}$ 单调减少. 利用分部积分可得

$$\begin{aligned}
a_n&=\int_0^1 x^n\sqrt{1-x^2}\mathrm{d}x=\frac{1}{n+1}\int_0^1\sqrt{1-x^2}\mathrm{d}\left(x^{n+1}\right)\\
&=\frac{1}{n+1}x^{n+1}\sqrt{1-x^2}\Big|_0^1+\frac{1}{n+1}\int_0^1\frac{x^{n+2}}{\sqrt{1-x^2}}\mathrm{d}x\\
&=\frac{1}{n+1}\int_0^1\frac{x^n\left(x^2-1\right)+x^n}{\sqrt{1-x^2}}\mathrm{d}x=-\frac{1}{n+1}a_n+\frac{1}{n+1}\int_0^1\frac{x^n}{\sqrt{1-x^2}}\mathrm{d}x\\
&=-\frac{1}{n+1}a_n-\frac{1}{n+1}\int_0^1 x^{n-1}\mathrm{d}\left(\sqrt{1-x^2}\right)\\
&=-\frac{1}{n+1}a_n-x^{n-1}\sqrt{1-x^2}\Big|_0^1+\frac{n-1}{n+1}\int_0^1 x^{n-2}\sqrt{1-x^2}\mathrm{d}x\\
&=-\frac{1}{n+1}a_n+\frac{n-1}{n+1}a_{n-2},
\end{aligned}$$

因此 $\dfrac{n+2}{n+1}a_n=\dfrac{n-1}{n+1}a_{n-2}$, 即 $a_n=\dfrac{n-1}{n+2}a_{n-2}\,(n=2,3,\cdots)$.

(2) 由于 $\dfrac{n-1}{n+2}=\dfrac{a_n}{a_{n-2}}<\dfrac{a_n}{a_{n-1}}<\dfrac{a_n}{a_n}=1$, 由夹逼准则知 $\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{a_n}{a_{n-1}}=1$.

20.(本题满分 11 分)

已知向量组 (I) $\boldsymbol{\alpha}_1=\begin{pmatrix}1\\1\\4\end{pmatrix},\boldsymbol{\alpha}_2=\begin{pmatrix}1\\0\\4\end{pmatrix},\boldsymbol{\alpha}_3=\begin{pmatrix}1\\2\\a^2+3\end{pmatrix}$, (II) $\boldsymbol{\beta}_1=\begin{pmatrix}1\\1\\a+3\end{pmatrix},\beta_2=\begin{pmatrix}0\\2\\1-a\end{pmatrix},\boldsymbol{\beta}_3=\begin{pmatrix}1\\3\\a^2+3\end{pmatrix}$. 若向量组 (I) 和向量组 (II) 等价, 求 a 的取值, 并将 $\boldsymbol{\beta}_3$ 用 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$ 线性表示.

解 记 $\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3)$, $\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{\beta}_1,\boldsymbol{\beta}_2,\boldsymbol{\beta}_3)$, 由于向量组向量组 (I) 和向量组 (II) 等价, 所以 $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{B})=r(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$. 对矩阵 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$ 作初等行变换得

$$\begin{aligned}
(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})&=\begin{pmatrix}1&1&1&1&0&1\\1&0&2&1&2&3\\4&4&a^2+3&a+3&1-a&a^2+3\end{pmatrix}\\
&\to\begin{pmatrix}1&0&2&1&2&3\\0&1&-1&0&-2&-2\\0&4&a^2-5&a-1&-7-a&a^2-9\end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\to\begin{pmatrix}1&0&2&1&2&3\\0&1&-1&0&-2&-2\\0&0&a^2-1&a-1&1-a&a^2-1\end{pmatrix}.$$

因此当 $a=1$ 时, $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{B})=r(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=2$, 两个向量组等价. 当 $a=-1$ 时, $r(\boldsymbol{A})=2\neq r(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=3$, 此时两个向量组不等价. 当 $a\neq\pm1$ 时, $r(\boldsymbol{A})=r(\boldsymbol{B})=3$, 两个向量组等价. 因此, 当且仅当 $a\neq-1$ 时, 两个向量组等价.

令 $\boldsymbol{\beta}_3=x_1\boldsymbol{\alpha}_1+x_2\boldsymbol{\alpha}_2+x_3\boldsymbol{\alpha}_3$, 当 $a=1$ 时, 由初等行变换得 $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\beta}_3)\to\begin{pmatrix}1&0&2&3\\0&1&-1&-2\\0&0&0&0\end{pmatrix}$,

解得 $\boldsymbol{\beta}_3=(3-2k)\boldsymbol{\alpha}_1+(-2+k)\boldsymbol{\alpha}_2+k\boldsymbol{\alpha}_3, k\in\mathbb{R}$.

当 $a\neq\pm1$ 时, $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{\beta}_3)\to\begin{pmatrix}1&0&0&1\\0&1&0&-1\\0&0&1&1\end{pmatrix}$, 此时有 $\boldsymbol{\beta}_3=\boldsymbol{\alpha}_1-\boldsymbol{\alpha}_2+\boldsymbol{\alpha}_3$.

21.(**本题满分 11 分**) 已知矩阵 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}-2&-2&1\\2&x&-2\\0&0&-2\end{pmatrix}$ 与 $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}2&1&0\\0&-1&0\\0&0&y\end{pmatrix}$ 相似.

(1) 求 x,y;

(2) 求可逆矩阵 $\boldsymbol{P}$ 使得 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{B}$.

解 (1) 由相似矩阵的性质可得

$$\begin{cases}|\boldsymbol{A}|=|\boldsymbol{B}|\\ \operatorname{tr}(\boldsymbol{A})=\operatorname{tr}(\boldsymbol{B})\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}4x-8=-2y\\ -2+x-2=2-1+y\end{cases},$$

解得 $x=3, y=-2$.

(2) $\boldsymbol{B}$ 是上三角矩阵, 因此 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 的特征值均为 $2,-1,-2$.

对矩阵 $\boldsymbol{B}$, 当 $\lambda_1=2$ 时, 由方程 $(2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 可得 λ_1 的一个特征向量 $\xi_1=(1,0,0)^{\mathrm{T}}$;

当 $\lambda_2=-1$ 时, 由方程 $(-\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 可得 λ_2 的一个特征向量 $\xi_1=(-1,3,0)^{\mathrm{T}}$;

当 $\lambda_3=-2$ 时, 由方程 $(-2\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 可得 λ_3 的一个特征向量 $\xi_1=(0,0,1)^{\mathrm{T}}$.

取 $\boldsymbol{P}_1=\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&3&0\\0&0&1\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{P}_1=\operatorname{diag}\{2,-1,-2\}$.

同理对矩阵 $\boldsymbol{A}$, 也可求出一组线性无关特征向量, 取 $\boldsymbol{P}_2=\begin{pmatrix}-1&-2&-1\\2&1&2\\0&0&4\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{P}_2^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_2=$

$\mathrm{diag}\{2,-1,-2\}$. 故

$$\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{P}_1=\boldsymbol{P}_2^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_2\Rightarrow(\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1})^{-1}\boldsymbol{A}(\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1})=\boldsymbol{B},$$

因此当取

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1}=\begin{pmatrix}-1&-2&-1\\2&1&2\\0&0&4\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&3&0\\0&0&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-1&-1&-1\\2&1&2\\0&0&4\end{pmatrix}$$

时, 则有 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{B}$.

22.(**本题满分 11 分**)

设随机变量 X 与 Y 相互独立, X 服从参数为 1 的指数分布, Y 的概率分布为 $P(Y=-1)=p, P(Y=1)=1-p(0<p<1)$. 令 $Z=XY$.

(1) 求 Z 的概率密度;

(2) p 为何值时, X 与 Z 不相关;

(3) X 与 Z 是否相互独立?

解 (1) X 的分布函数为 $F_X(x)=\begin{cases}1-\mathrm{e}^{-x}, & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases}$. 由 X,Y 的独立性可得 Z 的分布函数

$$\begin{aligned}F_Z(z)&=P(Z\leqslant z)=P(XY\leqslant z)\\&=P(XY\leqslant z\,|Y=-1)P(Y=-1)+P(XY\leqslant z\,|Y=1)P(Y=1)\\&=pP(-X\leqslant z\,|Y=-1)+(1-p)P(X\leqslant z\,|Y=1)\\&=pP(X\geqslant -z)+(1-p)P(X\leqslant z)\\&=p\big(1-F_X(-z)\big)+(1-p)F_X(z)=\begin{cases}p\mathrm{e}^{z}, & z\leqslant 0\\ 1+(1-p)\mathrm{e}^{-z}, & z>0\end{cases}\end{aligned}$$

因此 Z 的概率密度为 $f_Z(z)=F_Z'(z)=\begin{cases}p\mathrm{e}^{z}, & z\leqslant 0\\ (1-p)\mathrm{e}^{-z}, & z>0\end{cases}$

(2) 由条件可得

$$\mathrm{Cov}(X,Z)=E(XZ)-EX\cdot EZ=EX^2\cdot EY-(EX)^2\cdot EY=DX\cdot EY=1-2p,$$

因此当 $p=\dfrac{1}{2}$ 时, $\mathrm{Cov}(X,Z)=0$, 即 $\rho_{XZ}=0$. 因此 $p=\dfrac{1}{2}$ 时, X 与 Z 不相关.

(3) 由 (2) 可知当 $p \neq \frac{1}{2}$ 时, X 和 Z 是相关的, 从而不独立. 而当 $p = \frac{1}{2}$ 时, 只需要注意到事件 $\left\{X \leqslant \frac{1}{2}\right\} \subset \left\{Z \leqslant \frac{1}{2}\right\}$, 所以

$$P\left(X \leqslant \frac{1}{2}, Z \leqslant \frac{1}{2}\right) = P\left(X \leqslant \frac{1}{2}\right) \neq P\left(X \leqslant \frac{1}{2}\right) P\left(Z \leqslant \frac{1}{2}\right),$$

因此对任意 $p \in (0,1)$, X, Z 不独立.

23.(本题满分 11 分)

设总体 X 的概率密度为

$$f(x,\sigma^2) = \begin{cases} \dfrac{A}{\sigma} \mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & x \geqslant \mu \\ 0, & x < \mu \end{cases},$$

μ 是已知参数, $\sigma > 0$ 是未知参数, A 是常数. $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是来自总体 X 的简单随机样本.

(1) 求 A;

(2) 求 σ^2 的最大似然估计量.

解 (1) 由概率密度的归一性可知 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\mathrm{d}x = 1$, 即

$$\begin{aligned}\int_{\mu}^{+\infty} \frac{A}{\sigma} \mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \mathrm{d}x &= \frac{A}{\sigma} \int_0^{+\infty} \mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \mathrm{d}t \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}A}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \mathrm{d}t = A\sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1,\end{aligned}$$

得 $A = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$.

(2) 设样本 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 对应的观测值为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 则似然函数

$$L(\sigma^2) = \prod_{i=1}^n f(x_i;\sigma^2) = \begin{cases} \displaystyle\prod_{i=1}^n \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sigma} \mathrm{e}^{-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & x_1, x_2 \cdots, x_n \geqslant \mu \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

当 $x_1, x_2, \cdots, x_n \geqslant \mu$ 时, 取对数 $\ln L\left(\sigma^2\right) = \sum_{i=1}^n \left[\ln\sqrt{\frac{2}{\pi}} - \frac{1}{2}\ln\sigma^2 - \frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$, 令

$$\frac{\mathrm{d}\ln L\left(\sigma^2\right)}{\mathrm{d}\sigma^2} = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{1}{2\sigma^2} + \frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^4}\right] = -\frac{n}{2\sigma^2} + \frac{\sum\limits_{i=1}^n (x_i-\mu)^2}{2\sigma^4} = 0,$$

解得 $\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (x_i-\mu)^2$, 因此 σ^2 的最大似然估计量为 $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (X_i-\mu)^2$.

15　2020 年考研数学三

一　选择题, 1 ～ 8 题, 每题 4 分, 共 32 分.

1. 设 $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{f(x)-a}{x-a}=b$, 则 $\lim\limits_{x\to a}\dfrac{\sin f(x)-\sin a}{x-a}=$　　(　　)

A. $b\sin a$　　B. $b\cos a$　　C. $b\sin f(a)$　　D. $b\cos f(a)$

解　利用拉格朗日中值定理得

$$\lim_{x\to a}\frac{\sin f(x)-\sin a}{x-a}=\lim_{x\to a}\cos\xi\frac{f(x)-f(a)}{x-a}=b\cos a.$$

2. 函数 $f(x)=\dfrac{e^{\frac{1}{x-1}}\ln|1+x|}{(e^x-1)(x-2)}$ 的第二类间断点的个数为　　(　　)

A. 1　　B. 2　　C. 3　　D. 4

解　显然, 所有的间断点为 $x=-1,0,1,2$, 其中 $x=-1,1,2$ 都是无穷间断点, 而 $x=0$ 则是可去间断点, 选 C.

3. 设奇函数 $f(x)$ 在 $(-\infty,+\infty)$ 上有连续导数, 则　　(　　)

A. $\int_0^x[\cos f(t)+f'(t)]\,dt$ 是奇函数　　B. $\int_0^x[\cos f(t)+f'(t)]\,dt$ 是偶函数

C. $\int_0^x[\cos f'(t)+f(t)]\,dt$ 是奇函数　　D. $\int_0^x[\cos f'(t)+f(t)]\,dt$ 是偶函数

解　易知 $\cos f(x)$ 与 $f'(x)$ 都是偶函数, 所以 $\cos f(x)+f'(x)$ 是偶函数, 那么 $\int_0^x[\cos f(t)+f'(t)]\,dt$ 是奇函数, 选 A.

4. 已知幂级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}na_n(x-2)^n$ 的收敛区间为 $(-2,6)$, 则 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_n(x+1)^{2n}$ 的收敛区间为 (　　)

A. $(-2,6)$　　B. $(-3,1)$　　C. $(-5,3)$　　D. $(-17,15)$

解　由题意知幂级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}na_nx^{n-1}$ 的收敛半径为 4, 那么它逐项积分以后的幂级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_nx^n$ 的收敛半径仍为 4. 那么幂级数 $\sum\limits_{n=1}^{\infty}a_n(x+1)^{2n}$ 的收敛区间满足 $(x+1)^2<4\Rightarrow -3<x<1$, 选 B.

5. 设四阶矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})$ 不可逆, a_{12} 的代数余子式 $A_{12}\neq 0,\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的列向量组, $\boldsymbol{A}^*$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的伴随矩阵, 则 $\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的通解为 ( )

A. $\boldsymbol{x}=k_1\boldsymbol{\alpha}_1+k_2\boldsymbol{\alpha}_2+k_3\boldsymbol{\alpha}_3$　　B. $\boldsymbol{x}=k_1\boldsymbol{\alpha}_1+k_2\boldsymbol{\alpha}_2+k_3\boldsymbol{\alpha}_4$

C. $\boldsymbol{x}=k_1\boldsymbol{\alpha}_1+k_2\boldsymbol{\alpha}_3+k_3\boldsymbol{\alpha}_4$　　D. $\boldsymbol{x}=k_1\boldsymbol{\alpha}_2+k_2\boldsymbol{\alpha}_3+k_3\boldsymbol{\alpha}_4$

解 因为 $\boldsymbol{A}$ 不可逆, 所以 $\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{A}=|\boldsymbol{A}|\boldsymbol{E}=\boldsymbol{O}$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 的列向量组 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 都是 $\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的解, 且 $r(\boldsymbol{A}^*)\leqslant 1$. 而 $A_{12}\neq 0$ 说明 $\boldsymbol{A}^*\neq\boldsymbol{O}$. 且 $\boldsymbol{A}$ 中对应的三列 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 是线性无关的, 即 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_4$ 是 $\boldsymbol{A}^*\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系, 因此正确答案选 C.

6. 设 $\boldsymbol{A}$ 为三阶矩阵, $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的属于特征值 1 的线性无关的特征向量, $\boldsymbol{\alpha}_3$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的属于特征值 -1 的特征向量, 则满足 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&-1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$ 的可逆矩阵 $\boldsymbol{P}$ 可为 ( )

A. $(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2,-\boldsymbol{\alpha}_3)$　　B. $(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_2,-\boldsymbol{\alpha}_3)$

C. $(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_3,-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2)$　　D. $(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2)$

解 同一个特征值对应的特征向量的非零线性组合仍然是这个特征值对应的特征向量, 于是

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2)=(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2)=(\boldsymbol{\alpha}_1+\boldsymbol{\alpha}_2,-\boldsymbol{\alpha}_3,\boldsymbol{\alpha}_2)\begin{pmatrix}1&0&0\\0&-1&0\\0&0&1\end{pmatrix},$$

因此正确答案选 D.

7. 设 A,B,C 为三个随机事件, 且

$$P(A)=P(B)=P(C)=\frac{1}{4},P(AB)=0,P(AC)=P(BC)=\frac{1}{12},$$

则 A,B,C 中恰有一个事件发生的概率为 ( )

A. $\dfrac{3}{4}$　　B. $\dfrac{2}{3}$　　C. $\dfrac{1}{2}$　　D. $\dfrac{5}{12}$

解 首先所求的概率为 $P(A\bar{B}\bar{C})+P(\bar{A}B\bar{C})+P(\bar{A}\bar{B}C)$, 其中

$$P(A\cup B\cup C)=P(A)+P(B)+P(C)-P(AB)-P(AC)-P(BC)-P(ABC)=\frac{7}{12},$$

$$\begin{aligned}P(A\bar{B}\bar{C})&=P(\bar{B}\bar{C})-P(\bar{A}\bar{B}\bar{C})=P(\overline{B\cup C})-P(\overline{A\cup B\cup C})\\&=1-P(B\cup C)-[1-P(A\cup B\cup C)]=P(A\cup B\cup C)-P(B\cup C)\\&=\frac{7}{12}-P(B)-P(C)+P(BC)=\frac{1}{6},\\P(\bar{A}B\bar{C})&=\frac{7}{12}-P(A)-P(C)+P(AC)=\frac{1}{6},\\P(\bar{A}\bar{B}C)&=\frac{7}{12}-P(A)-P(B)+P(AB)=\frac{1}{12},\end{aligned}$$

因此 A,B,C 中恰有一个事件发生的概率为 $\dfrac{1}{6}+\dfrac{1}{6}+\dfrac{1}{12}=\dfrac{5}{12}$, 选 D.

8. 设二维随机变量 (X,Y) 服从 $N\left(0,0;1,4;-\dfrac{1}{2}\right)$, 则下列服从标准正态分布且与 X 独立的是 (　)

A. $\dfrac{\sqrt{5}}{5}(X+Y)$　　B. $\dfrac{\sqrt{5}}{5}(X-Y)$　　C. $\dfrac{\sqrt{3}}{3}(X+Y)$　　D. $\dfrac{\sqrt{3}}{3}(X-Y)$

解　首先有 (X,Y) 服从二维正态部分, $X\sim N(0,1), Y\sim N(0,4)$. 而

$$(X,X+Y)=(X,Y)\begin{pmatrix}1&1\\0&1\end{pmatrix},\quad \begin{vmatrix}1&1\\0&1\end{vmatrix}\neq 0,$$

所以 $(X,X+Y)$ 也服从二维正态分布. 且 $E(X+Y)=0, D(X+Y)=DX+DY+2\rho_{XY}\sqrt{DX}\sqrt{DY}=3$, 所以 $X+Y\sim N(0,3)$, 于是 $\dfrac{\sqrt{3}}{3}(X+Y)\sim N(0,1)$. 又

$$\operatorname{Cov}(X,X+Y)=\operatorname{Cov}(X,X)+\operatorname{Cov}(X,Y)=DX+\rho_{XY}\sqrt{DX}\sqrt{DY}=0,$$

因此 X 与 $\dfrac{\sqrt{3}}{3}(X+Y)$ 独立, 选 C. 而 $\operatorname{Cov}(X,X-Y)\neq 0$, 所以 $X,X-Y$ 不独立.

二　填空题, 9 ～ 14 题, 每题 4 分, 共 24 分.

9. 设 $z=\arctan[xy+\sin(x+y)]$, 则 $\mathrm{d}z\big|_{(0,\pi)}=$________.

解　直接计算得

$$\frac{\partial z}{\partial x}=\frac{y+\cos(x+y)}{1+[xy+\sin(x+y)]^2},\quad \frac{\partial z}{\partial y}=\frac{x+\cos(x+y)}{1+[xy+\sin(x+y)]^2},$$

于是 $\dfrac{\partial z}{\partial x}\Big|_{(0,\pi)}=\pi-1$, $\dfrac{\partial z}{\partial x}\Big|_{(0,\pi)}=-1$, 因此 $\mathrm{d}z\big|_{(0,\pi)}=(\pi-1)\,\mathrm{d}x-\mathrm{d}y$.

10. 曲线 $x+y+\mathrm{e}^{2xy}=0$ 点 $(0,-1)$ 处的切线方程为________.

解　原方程两边对 x 求导得 $1+y'+\mathrm{e}^{2xy}(2y+2xy')=0$, 代入 $x=0, y=-1$ 得 $y'=1$, 所以曲线在 $(0,-1)$ 处的切线方程为 $y=x-1$.

11. 设产量为 Q, 单价为 P, 厂商成本函数为 $C(Q)=100+13Q$, 需求函数为 $Q(P)=\dfrac{800}{P+3}-2$, 则厂商取得最大利润时的产量为________.

解　由 $Q=\dfrac{800}{P+3}-2$ 可知 $P=\dfrac{800}{Q+2}-3$, 则利润函数为

$$L(Q)=\left(\frac{800}{Q+2}-3\right)Q-(100+13Q).$$

令 $\dfrac{\mathrm{d}L(Q)}{\mathrm{d}Q}=\dfrac{1600}{(Q+2)^2}-16=0\Rightarrow Q=8$, 且 $\dfrac{\mathrm{d}^2L(Q)}{\mathrm{d}Q^2}=-\dfrac{3200}{(Q+2)^3}<0$, 因此 $Q=8$ 时, 取得最大利润.

12.设平面区域 $D=\left\{(x,y)\middle|\frac{x}{2}\leqslant y\leqslant\frac{1}{1+x^2},0\leqslant x\leqslant 1\right\}$, 则 D 绕 y 轴旋转所成旋转体的体积为________.

解 $V=2\pi\int_0^1 x\left(\frac{1}{1+x^2}-\frac{x}{2}\right)\mathrm{d}x=\pi\left(\ln(1+x^2)-\frac{1}{3}x^3\right)\Big|_0^1=\pi\left(\ln 2-\frac{1}{3}\right)$.

13.行列式 $\begin{vmatrix} a & 0 & -1 & 1\\ 0 & a & 1 & -1\\ -1 & 1 & a & 0\\ 1 & -1 & 0 & a\end{vmatrix}=$________.

解 利用行列式的行列变换得

$$\begin{vmatrix} a & 0 & -1 & 1\\ 0 & a & 1 & -1\\ -1 & 1 & a & 0\\ 1 & -1 & 0 & a\end{vmatrix}=\begin{vmatrix} a & 0 & -1 & 1\\ 0 & a & 1 & -1\\ -1 & 1 & a & 0\\ 0 & 0 & a & a\end{vmatrix}=\begin{vmatrix} 0 & a & -1+a^2 & 1\\ 0 & a & 1 & -1\\ -1 & 1 & a & 0\\ 0 & 0 & a & a\end{vmatrix}$$

$$=-\begin{vmatrix} a & -1+a^2 & 1\\ a & 1 & -1\\ 0 & a & a\end{vmatrix}=-\begin{vmatrix} a & a^2-2 & 1\\ a & 2 & -1\\ 0 & 0 & a\end{vmatrix}=a^4-4a^2.$$

14.随机变量 X 的分布律为 $P(X=k)=\frac{1}{2^k},k=1,2,\cdots$, Y 为 X 被 3 除的余数, 则 $EY=$________.

解 由题意知 Y 的取值为 $0,1,2$, 且

$$P(Y=0)=\sum_{n=1}^{\infty}P(X=3n)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{8^n}=\frac{1}{7},$$

$$P(Y=1)=\sum_{n=0}^{\infty}P(X=3n+1)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{2}\frac{1}{8^n}=\frac{4}{7},$$

$$P(Y=2)=\sum_{n=0}^{\infty}P(X=3n+2)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{4}\frac{1}{8^n}=\frac{2}{7}.$$

所以 $EY=0\times\frac{1}{7}+1\times\frac{4}{7}+2\times\frac{2}{7}=\frac{8}{7}$.

三　解答题, 15 ～ 23 题, 共 94 分.

15.(本题满分 10 分)

设 a,b 为常数, 且当 $n\to\infty$ 时, $\left(1+\frac{1}{n}\right)^n-\mathrm{e}$ 与 $\frac{b}{n^a}$ 为等价无穷小, 求 a,b 的值.

解 直接利用等价无穷小得

$$\left(1+\frac{1}{n}\right)^n-\mathrm{e}=\mathrm{e}^{n\ln\left(1+\frac{1}{n}\right)}-\mathrm{e}=\mathrm{e}\left(\mathrm{e}^{n\ln\left(1+\frac{1}{n}\right)-1}-1\right)$$
$$\sim\mathrm{e}\left[n\ln\left(1+\frac{1}{n}\right)-1\right]=\mathrm{e}\left[n\left(\frac{1}{n}-\frac{1}{2n^2}+o\left(\frac{1}{n^2}\right)\right)-1\right]$$
$$=-\frac{\mathrm{e}}{2n}+o\left(\frac{1}{n}\right)\sim-\frac{\mathrm{e}}{2n}.$$

因此 $a=1,b=-\dfrac{\mathrm{e}}{2}$.

16.(**本题满分** 10 **分**)

求函数 $f(x,y)=x^3+8y^3-xy$ 的极值.

解 由 $\begin{cases}\dfrac{\partial f}{\partial x}=3x^2-y=0\\\dfrac{\partial f}{\partial y}=24y^2-x=0\end{cases}$ 得 $(x,y)=(0,0)$ 或 $\left(\dfrac{1}{6},\dfrac{1}{12}\right)$. 进一步有

$$A=\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}=6x,B=\frac{\partial^2 f}{\partial x\partial y}=-1,\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}=48y.$$

于是当 $(x,y)=(0,0)$ 时, $A=0,B=-1,C=0$, 那么 $AC-B^2=-1<0$, 所以 $(0,0)$ 不是极值点; 当 $(x,y)=\left(\dfrac{1}{6},\dfrac{1}{12}\right)$ 时, $A=1,B=-1,C=4$, 则 $AC-B^2=3>0$ 且 $A>0$, 所以 $\left(\dfrac{1}{6},\dfrac{1}{12}\right)$ 为极小值点, 且极小值 $f\left(\dfrac{1}{6},\dfrac{1}{12}\right)=-\dfrac{1}{216}$.

17.(**本题满分** 10 **分**)

设函数 $y=f(x)$ 满足 $y''+2y'+5y=0$, 且 $f(0)=1,f'(0)=-1$.

(1) 求 $f(x)$;

(2) 设 $a_n=\displaystyle\int_{n\pi}^{+\infty}f(x)\,\mathrm{d}x$, 求 $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}a_n$.

解 (1) 微分方程 $y''+2y'+5y=0$ 的特征方程为 $\lambda^2+2\lambda+5=0$, 特征根为 $\lambda_{1,2}=-1\pm2\mathrm{i}$, 通解为 $y=\mathrm{e}(C_1\cos2x+C_2\sin2x)$, 代入 $f(0)=0,f'(0)=-1$ 得 $C_1=1,C_2=0$, 因此 $f(x)=\mathrm{e}^{-x}\cos2x$.

(2) 直接计算得

$$a_n=\int_{n\pi}^{+\infty}f(x)\,\mathrm{d}x=\frac{1}{5}\left(-\mathrm{e}^{-x}\cos2x+2\mathrm{e}^{-x}\sin2x\right)\Big|_{n\pi}^{+\infty}=\frac{1}{5}\mathrm{e}^{-n\pi}.$$

所以 $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}a_n=\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{\infty}\mathrm{e}^{-n\pi}=\frac{1}{5(\mathrm{e}^{\pi}-1)}$.

18.(本题满分 10 分)

设区域 $D=\left\{(x,y)\middle|x^2+y^2\leqslant 1, y\geqslant 0\right\}$, 连续函数 $f(x,y)$ 满足

$$f(x,y)=y\sqrt{1-x^2}+x\iint\limits_D f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y,$$

计算 $\iint\limits_D xf(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y$.

解 令 $\iint\limits_D f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=A$, 则 $f(x,y)=y\sqrt{1-x^2}+Ax$, 两边在区域 D 上积分可得

$$\begin{aligned}A&=\iint\limits_D f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\iint\limits_D y\sqrt{1-x^2}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y+\iint\limits_D Ax\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\\&=2\iint\limits_{D_1} y\sqrt{1-x^2}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=2\int_0^1\sqrt{1-x^2}\,\mathrm{d}x\int_0^{\sqrt{1-x^2}}y\,\mathrm{d}y\\&=\int_0^1(1-x^2(^{\frac{3}{2}}\,\mathrm{d}x=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\cos^4 t\,\mathrm{d}t=\frac{3\pi}{16}.\end{aligned}$$

其中 D_1 为 D 在第一象限的部分. 于是 $f(x,y)=y\sqrt{1-x^2}+\frac{3\pi}{16}x$, 所以

$$\begin{aligned}\iint\limits_D xf(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y&=\iint\limits_D x\left(y\sqrt{1-x^2}+\frac{3\pi}{16}x\right)\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\\&=\frac{3\pi}{16}\iint\limits_D x^2\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y=\frac{3\pi}{16}\int_0^{\pi}\mathrm{d}\theta\int_0^1 r^3\cos^2\theta\,\mathrm{d}r\\&=\frac{3\pi^2}{128}.\end{aligned}$$

19.(本题满分 10 分)

设函数 $f(x)$ 在区间 $[0,2]$ 上具有连续导数, $f(0)=f(2)=0$, $M=\max\limits_{x\in[0,2]}|f(x)|$, 证明:

(1) 存在 $\xi\in(0,2)$, 使得 $|f'(\xi)|\geqslant M$;

(2) 若对任意 $x\in(0,2)$, $|f'(x)|\leqslant M$, 则 $M=0$.

证 (1) 设 $M=\max\limits_{x\in[0,2]}|f(x)|=|f(x_0)|$, 由拉格朗日中值定理知存在 $\xi_1\in(0,x_0)$, $\xi_2\in(x_0,2)$, 使得

$$|f'(\xi_1)|=\left|\frac{f(x_0)-f(0)}{x-x_0}\right|=\frac{M}{x_0},\ |f'(\xi_2)|=\left|\frac{f(2)-f(x_0)}{2-x_0}\right|=\frac{M}{2-x_0}.$$

注意到

$$\left|f'(\xi_1)\right|+\left|f'(\xi_2)\right|=\frac{M}{x_0}+\frac{M}{2-x_0}\geqslant\frac{2M}{\sqrt{x_0(2-x_0)}}\geqslant M,$$

那么取 $|f'(\xi)|=\max\{|f'(\xi_1)|,|f'(\xi_2)|\}$ 时, 必有 $|f'(\xi)|\geqslant M$.

(2) 由条件有 $|f'(\xi_1)|=\dfrac{M}{x_0}\leqslant M$, 因此 $x_0\geqslant 1$; $|f'(\xi_2)|=\dfrac{M}{2-x_0}\leqslant M$, 因此 $x_0\leqslant 1$. 于是只能 $x_0=1$, 即 $|f(1)|=M$.

$$M=|f(1)-f(0)|=\left|\int_0^1 f'(x)\,\mathrm{d}x\right|\leqslant\int_0^1|f'(x)|\,\mathrm{d}x\leqslant\int_0^1 M\,\mathrm{d}x=M,$$

等号成立当且切仅当 $|f'(x)|\equiv M, x\in[0,1]$. 而 $f(x)$ 在 $x=1$ 处取得极值, 由费马定理可知 $f'(1)=0$, 因此 $M=0$.

20.(**本题满分 11 分**)

设二次型 $f(x_1,x_2)=x_1^2-4x_1x_2+4x_2^2$ 经过正交变换 $\begin{pmatrix}x_1\\x_2\end{pmatrix}=\boldsymbol{Q}\begin{pmatrix}y_1\\y_2\end{pmatrix}$ 化为二次型 $g(y_1,y_2)=ay_1^2+4y_1y_2+by_2^2$, 其中 $a\geqslant b$.

(1) 求 a,b 的值;

(2) 求正交矩阵 $\boldsymbol{Q}$.

解 (1) 记 $\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&-2\\-2&4\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}a&2\\2&b\end{pmatrix}$, 则 $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{Q}$ 为正交矩阵. 因为 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 相似, 所以 $\begin{cases}\mathrm{tr}(\boldsymbol{A})=\mathrm{tr}(\boldsymbol{B})\\|\boldsymbol{A}|=|\boldsymbol{B}|\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}1+4=a+b\\1\times 4=ab\end{cases}$, $a\geqslant b\Rightarrow a=4,b=1$.

(2) 易知 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}$ 的特征值均为 $\lambda_1=0,\lambda_2=5$. 当 $\lambda_1=0$ 时, 方程组 $(0\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系为 $\boldsymbol{\alpha}_1=(2,1)^{\mathrm{T}}$, 方程组 $(0\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系为 $\boldsymbol{\beta}_1=(1,-2)^{\mathrm{T}}$; 当 $\lambda_2=5$ 时, 方程组 $(5\boldsymbol{E}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系为 $\boldsymbol{\alpha}_2=(1,-2)^{\mathrm{T}}$, 方程组 $(5\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 的基础解系为 $\boldsymbol{\beta}_2=(2,1)^{\mathrm{T}}$. 令 $\boldsymbol{P}_1=\begin{pmatrix}2&1\\1&-2\end{pmatrix}$, $\boldsymbol{P}_2=\begin{pmatrix}1&2\\-2&1\end{pmatrix}$, 则

$$\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_1=\boldsymbol{P}_2^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{P}_2=\begin{pmatrix}0&\\&5\end{pmatrix}.$$

所以 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{P}_1^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2^{-1}=(\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2^{-1})^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2^{-1}$, 且

$$\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2^{-1}=\begin{pmatrix}2&1\\1&-2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&2\\-2&1\end{pmatrix}^{-1}=\frac{1}{5}\begin{pmatrix}4&-3\\-3&4\end{pmatrix}$$

是正交矩阵, 因此 $\boldsymbol{Q}=\dfrac{1}{5}\begin{pmatrix}4&-3\\-3&4\end{pmatrix}$.

21.(本题满分 11 分)

设 $\boldsymbol{A}$ 为二阶矩阵, $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha})$, 其中 $\boldsymbol{\alpha}$ 是非零向量, 且不是 $\boldsymbol{A}$ 的特征向量.

(1) 证明: $\boldsymbol{P}$ 是可逆矩阵;

(2) 若 $\boldsymbol{A}^2\boldsymbol{\alpha}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}-6\boldsymbol{\alpha}=\boldsymbol{0}$, 求 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}$, 并判断 $\boldsymbol{A}$ 是否相似于对角矩阵.

解 (1) 由题意 $\boldsymbol{\alpha}$ 是非零向量, $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}\neq k\boldsymbol{\alpha}$, 所以 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\alpha}$ 线性无关, 即 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\alpha})$ 为可逆矩阵.

(2) $\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha})=(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{A}^2\boldsymbol{\alpha})=(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha}, 6\boldsymbol{\alpha}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha})=(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{A}\boldsymbol{\alpha})\begin{pmatrix}0&6\\1&-1\end{pmatrix}=\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}0&6\\1&-1\end{pmatrix}$,

所以 $\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}0&6\\1&-1\end{pmatrix}$, 即 $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}0&6\\1&-1\end{pmatrix}$ 相似. 不难知 $\boldsymbol{B}$ 有两个不同的特征值 $\lambda_1=2, \lambda_2=-3$, 因此 $\boldsymbol{A}$ 的特征值也是 $2, -3$, 所以 $\boldsymbol{A}$ 可以相似对角化.

22.(本题满分 11 分)

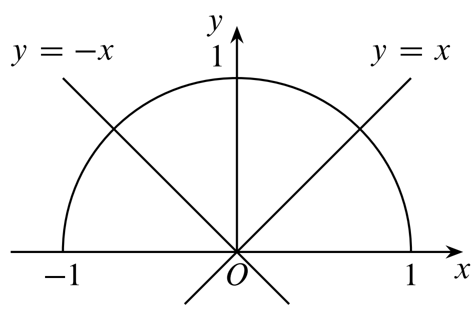
设二维随机变量 (X, Y) 在区域 $D=\{(x, y): 0<y<\sqrt{1-x^2}\}$ 上服从均匀分布, 且

$$Z_1=\begin{cases}1, & X-Y>0\\0, & X-Y\leqslant 0\end{cases},\quad Z_2=\begin{cases}1, & X+Y>0\\0, & X+Y\leqslant 0\end{cases}.$$

(1) 求二维随机变量 (Z_1, Z_2) 的概率分布;

(2) 求 Z_1, Z_2 的相关系数.

解 (1) 如图, 不难得知



第 22 题图

$$P(Z_1=0, Z_2=0)=P(X-Y\leqslant 0, X+Y\leqslant 0)=P(Y\geqslant X, Y\leqslant -X)=\frac{1}{4},$$
$$P(Z_1=0, Z_2=1)=P(X-Y\leqslant 0, X+Y>0)=P(Y\geqslant X, Y>-X)=\frac{1}{2},$$
$$P(Z_1=1, Z_2=0)=P(X-Y>0, X+Y\leqslant 0)=P(Y<X, Y\leqslant -X)=0,$$
$$P(Z_1=1, Z_2=1)=P(X-Y>0, X+Y>0)=P(Y<X, Y>-X)=\frac{1}{4}.$$

因此 (Z_1, Z_2) 的联合分布为

$Z_1 \backslash Z_2$	0	1	
0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$
1	0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	

(2) 由 (Z_1, Z_2) 的联合分布律可得边缘分布律为

$$Z_1 \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} \end{pmatrix}, \quad Z_2 \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} \end{pmatrix}.$$

于是 $E(Z_1) = \frac{1}{4}, E(Z_2) = \frac{3}{4}, D(Z_1) = D(Z_2) = \frac{3}{16}, E(Z_1 Z_2) = \frac{1}{4}$, 因此 Z_1, Z_2 的相关系数为

$$\rho_{Z_1, Z_2} = \frac{\mathrm{Cov}(Z_1, Z_2)}{\sqrt{D(Z_1)}\sqrt{D(Z_2)}} = \frac{E(Z_1 Z_2) - E(Z_1)E(Z_2)}{\frac{3}{16}} = \frac{1}{3}.$$

23.(**本题满分 11 分**)

设某种元件的使用寿命 T 的分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}, & t > 0 \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

其中 θ, m 为参数且大于零.

(1) 求概率 $P(T > t)$ 与 $P(T > s + t | T > s)$, 其中 $s > 0, t > 0$;

(2) 任取 n 个这种元件做寿命试验, 测得他们的寿命分别为 $t_1, t_2, \cdots, t_n$, 若 m 已知, 求 θ 的最大似然估计值 $\hat{\theta}$.

解 (1) 当 $s > 0, t > 0$ 时

$$\begin{aligned} P(T > t) &= 1 - F(t) = \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}, \\ P(T > s + t | T > s) &= \frac{P(T > s + t, T > s)}{P(T > s)} \\ &= \frac{P(T > s + t)}{P(T > s)} = \frac{\mathrm{e}^{-\left(\frac{s+t}{\theta}\right)^m}}{\mathrm{e}^{-\left(\frac{s}{\theta}\right)^m}} = \mathrm{e}^{-\frac{(s+t)^m - s^m}{\theta^m}}. \end{aligned}$$

(2) 总体 T 的概率密度为 $f(t)=\begin{cases}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}\dfrac{mt^{m-1}}{\theta^m}, & t>0\\ 0, & 其他\end{cases}$, 则样本的似然函数为

$$L(\theta)=\prod_{i=1}^{n}f(t_i)=\begin{cases}\mathrm{e}^{-\frac{1}{\theta^m}\sum\limits_{i=1}^{n}t^m}m^n\left(t_1t_2\cdots t_n\right)^{m-1}\theta^{-nm}, & t_1,t_2,\cdots,t_n>0\\ 0, & 其他\end{cases}.$$

当 $t_1,t_2,\cdots,t_n>0$ 时, $\ln L(\theta)=-\dfrac{1}{\theta^m}\sum\limits_{i=1}^{n}t^m+n\ln m+(m-1)\ln(t_1t_2\cdots t_n)-nm\ln\theta$, 令

$$\frac{\mathrm{d}\ln(\theta)}{\mathrm{d}\theta}=\frac{m}{\theta^{m+1}}\sum_{i=1}^{n}t_i^m-\frac{nm}{\theta}=0\Rightarrow\theta=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i^m\right)^{\frac{1}{m}},$$

即 θ 的最大似然估计值为 $\hat{\theta}=\left(\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}t_i^m\right)^{\frac{1}{m}}$.