

2024 考研 301

数学

复习笔记

wjl

CC BY-NC 4.0

2023 年 12 月 18 日

目录

1	一元函数	2
1.1	函数极限与连续	2
1.2	一元函数微分学	2
1.3	一元函数积分学	2
1.4	中值定理	3
2	多元函数	4
2.1	多元函数微分学	4
2.2	空间解析几何	4
2.3	多元函数积分学	5
3	微分方程	8
3.1	一阶微分方程	8
3.2	二阶可降阶的微分方程	8
3.3	高阶常系数线性微分方程	8
3.4	n 阶常系数齐次线性微分方程的解	8
4	无穷级数	9
4.1	判敛法	9
4.2	幂级数	9
4.3	傅里叶级数	9
5	线性代数	10
5.1	行列式和矩阵	10
5.2	向量组	10
5.3	线性方程组	10
5.4	特征值与特征向量	11
5.5	二次型	11
6	概率论与数理统计	12
6.1	随机变量	12
6.2	大数定理与中心极限定理	13
6.3	统计量及其分布	13
6.4	参数估计与假设检验	14

1 一元函数

1.1 函数极限与连续

1. 等价无穷小:

$$(1+x)^{\frac{1}{x}} - 1 \sim -\frac{e}{2}x (x \rightarrow 0^+), \quad 1 - \cos^a x \sim \frac{\alpha}{2}x^2 (x \rightarrow 0), \quad \ln(x + \sqrt{1+x^2}) \sim x (x \rightarrow 0).$$

$$\sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + o(x^3), \quad \tan x = x + \frac{1}{3}x^3 + o(x^3), \quad \arcsin x = x + \frac{1}{6}x^3 + o(x^3), \quad \arctan x = x - \frac{1}{3}x^3 + o(x^3).$$

2. 变上限积分: 当 $x \rightarrow 0$ 时, $f(x) \sim ax^m, g(x) \sim bx^n, ab \neq 0, m, n$ 为正整数, 则 $F(x)$ 是 x 的 $n(m+1)$ 阶无穷小: $F(x) = \int_0^{g(x)} f(t)dt \sim \int_0^{bx^n} at^m dt \sim Cx^{n(m+1)}.$

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n \sum_{k=1}^n \ln\left(1 + \frac{k}{n^2}\right) - \frac{1}{2}(n+1) \right] &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ n \sum_{k=1}^n \left[\frac{k}{n^2} - \frac{k^2}{2n^4} + o\left(\frac{k^2}{n^4}\right) \right] - \frac{1}{2}(n+1) \right\} \\ &= -\frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^4} + \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 o\left(\frac{1}{n^2}\right) = -\frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} n \sum_{k=1}^n \frac{k^2}{n^4} = -\frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)}{n^3} = -\frac{1}{6}. \end{aligned}$$

1.2 一元函数微分学

1. 反函数的导数: $\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}}, \quad x' = \frac{1}{y'}, \quad \frac{d^2x}{dy^2} = \frac{d\left(\frac{dx}{dy}\right)}{dy} = \frac{d\left(\frac{\frac{1}{dy}}{dx}\right)}{dy} = -\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(\frac{dy}{dx}\right)^3}, \quad x'' = -\frac{y''}{(y')^3}.$

2. 曲率和曲率半径: 曲率 $k = \frac{|y''|}{[1 + (y')^2]^{\frac{3}{2}}}$, 曲率半径 $R = \frac{1}{k}.$

1.3 一元函数积分学

1. 反常积分: **2010-03, 2016-01** 比较判别法: $\int_0^1 \frac{1}{x^p} dx \begin{cases} 0 < p < 1, & \text{收敛,} \\ p \geq 1, & \text{发散.} \end{cases} \quad \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^p} dx \begin{cases} p > 1, & \text{收敛,} \\ p \leq 1, & \text{发散.} \end{cases}$

1) 设函数 $f(x), g(x)$ 在区间 $[a, +\infty)$ 上连续, 且 $0 \leq f(x) \leq g(x), a \leq x \leq +\infty$, 则

当 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 收敛时, $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 收敛; 当 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 发散时, $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 发散.

2) 设函数 $f(x), g(x)$ 在区间 $[a, +\infty)$ 上连续, 且 $f(x) \geq 0, g(x) \geq 0, \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \lambda$ (有限或 ∞), 则

a. 当 $\lambda \neq 0$ 时, $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 与 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 有相同的敛散性;

b. 当 $\lambda = 0$ 时, 若 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 收敛, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 也收敛;

c. 当 $\lambda = \infty$ 时, 若 $\int_a^{+\infty} g(x)dx$ 发散, 则 $\int_a^{+\infty} f(x)dx$ 也发散.

2. 常用公式:

1) 区间再现公式:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b f(a+b-x)dx, \quad \int_a^b f(x)dx = \frac{1}{2} \int_a^b [f(x) + f(a+b-x)] dx.$$

2) 华里士公式:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^n x dx = \begin{cases} \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n-3}{n-2} \cdots \frac{2}{3} \cdot 1, & n \text{ 为大于1的奇数,} \\ \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n-3}{n-2} \cdots \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2}, & n \text{ 为正偶数.} \end{cases}$$

3) 对数-三角公式:

$$\int e^{ax} \sin bxdx = \frac{\begin{vmatrix} (e^{ax})' & (\sin bx)' \\ e^{ax} & \sin bx \end{vmatrix}}{a^2 + b^2} + C, \quad \int e^{ax} \cos bxdx = \frac{\begin{vmatrix} (e^{ax})' & (\cos bx)' \\ e^{ax} & \cos bx \end{vmatrix}}{a^2 + b^2} + C.$$

3. Γ 函数:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \stackrel{x=t^2}{=} 2 \int_0^{+\infty} t^{2\alpha-1} e^{-t^2} dt (x, t > 0).$$

$$\Gamma(\alpha+1) = \int_0^{+\infty} x^\alpha e^{-x} dx = - \int_0^{+\infty} x^\alpha d(e^{-x}) = -x^\alpha e^{-x} \Big|_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} e^{-x} \alpha x^{\alpha-1} dx = \alpha \Gamma(\alpha).$$

$$\Gamma(1) = 1, \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}, \Gamma(2) = 1, \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) = \frac{3}{4}\sqrt{\pi}, \Gamma(n+1) = n!.$$

4. 极坐标表示的曲线在直角坐标系下的切线和法线:

24 超越 4-12 曲线 $r = 1 + \cos \theta$ 在点 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 处的法线方程: $y = \frac{\sqrt{3}}{4}$.

$$\begin{cases} x|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = r \cos \theta = (1 + \cos \theta) \cos \theta|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{4}, \\ y|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = r \sin \theta = (1 + \cos \theta) \sin \theta|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = \frac{\sqrt{3}}{4}. \end{cases} \text{ 则 } \frac{dx}{dy} \Big|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = \frac{dx/d\theta}{dy/d\theta} \Big|_{\theta=\frac{2\pi}{3}} = 0 \Rightarrow y = \frac{\sqrt{3}}{4}.$$

5. 旋转体体积:

1) 平面曲线绕定直线旋转: 设平面曲线 $L: y = f(x), a \leq x \leq b$, 且 $f(x)$ 可导, 定直线 $L_0: Ax + By + C = 0$, 且过 L_0 的任一条垂线与 L 至多有 1 个交点, 则 L 绕 L_0 旋转一周所得旋转体体积为:

$$V = \frac{\pi}{(A^2 + B^2)^{\frac{3}{2}}} \int_a^b [Ax + By + C]^2 |Af'(x) - B| dx.$$

2) 平面曲边梯形绕 x 轴旋转: $V = \pi \int_a^b f^2(x) dx$, 绕 y 轴旋转: $V = 2\pi \int_a^b x|f(x)| dx$.

3) 平面图形 $D = \{(r, \theta) | 0 \leq r \leq r(\theta), \theta \in [\alpha, \beta] \in [0, \pi]\}$ 绕极轴旋转:

$$V = \frac{2\pi}{3} \int_\alpha^\beta r^3(\theta) \sin \theta d\theta.$$

6. 旋转曲面的面积 (侧面积):

$$S = 2\pi \int_a^b |y(x)| \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx. \quad S = 2\pi \int_\alpha^\beta |y(t)| \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt.$$

1.4 中值定理

1. 乘积求导公式 $(uv)' = u'v + uv'$ 的逆用: $[f^2(x)]' = 2f(x) \cdot f'(x)$, $[f(x) \cdot f'(x)]' = [f'(x)]^2 + f(x)f''(x)$.
 $[f(x)e^{\varphi(x)}]' = f'(x)e^{\varphi(x)} + f(x)e^{\varphi(x)} \cdot \varphi'(x) = [f'(x) + f(x)\varphi'(x)] e^{\varphi(x)}.$

2. 商的求导公式 $\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$ 的逆用: $\left[\frac{f(x)}{x}\right]' = \frac{f'(x)x - f(x)}{x^2}$, $\left[\frac{f'(x)}{f(x)}\right]' = \frac{f''(x)f(x) - [f'(x)]^2}{f^2(x)}.$

$$[\ln f(x)]' = \frac{f'(x)}{f(x)}, \quad [\ln f(x)]'' = \left[\frac{f'(x)}{f(x)}\right]' = \frac{f''(x)f(x) - [f'(x)]^2}{f^2(x)}.$$

3. 中值定理和不等式:

1) 积分中值定理: 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 则存在 $\xi \in (a, b)$, 使得 $\int_a^b f(x) dx = f(\xi)(b - a)$.

2) 柯西积分不等式: $\left(\int_a^b f(x)g(x) dx\right)^2 \leq \int_a^b f^2(x) dx \int_a^b g^2(x) dx.$

曲线 $x^3 + y^3 = 3axy (a > 0)$ 的渐近线:

设 $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{y}{x} = k$, $\lim_{x \rightarrow \infty} (y - kx) = b$, 等式变形为 $1 + \left(\frac{y}{x}\right)^3 = \frac{3a}{x} \cdot \frac{y}{x}$, 两边取极限, 得 $k = -1$.

则 $b = \lim_{x \rightarrow \infty} (y + x)$, 又 $x^3 + y^3 = (x + y)(x^2 - xy + y^2)$, 等式变形为 $x + y = \frac{3axy}{x^2 - xy + y^2} = \frac{3a \frac{y}{x}}{1 - \frac{y}{x} + \left(\frac{y}{x}\right)^2},$

两边取极限, 得 $b = -a$, 即渐近线为 $y = -x - a$.

2 多元函数

2.1 多元函数微分学

1. 全微分: 函数在 $z = f(x, y)$ 点 (x_0, y_0) 处可微等价于

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{f(x,y) - f(x_0,y_0) - f'_x(x_0,y_0)(x-x_0) - f'_y(x_0,y_0)(y-y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} = 0$$

2. 偏导数连续的判断: 判断函数 $z = f(x, y)$ 在特殊点 (x_0, y_0) 处的偏导数是否连续:

1) 用定义法求 $f'_x(x_0, y_0), f'_y(x_0, y_0)$, 用公式法求 $f'_x(x, y), f'_y(x, y)$.

2) 计算 $\lim_{x \rightarrow x_0} f'_x(x, y), \lim_{y \rightarrow y_0} f'_y(x, y)$, 看 $\lim_{x \rightarrow x_0} f'_x(x, y) = f'_x(x_0, y_0), \lim_{y \rightarrow y_0} f'_y(x, y) = f'_y(x_0, y_0)$ 是否成立, 若成立, 则 $z = f(x, y)$ 在点 (x_0, y_0) 处的偏导数是连续的.

3. 隐函数求导: 设 $\begin{cases} F(x, y, z) = 0, \\ G(x, y, z) = 0, \end{cases}$ 当满足 $\frac{\partial(F, G)}{\partial(y, z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F}{\partial y} & \frac{\partial F}{\partial z} \\ \frac{\partial G}{\partial y} & \frac{\partial G}{\partial z} \end{vmatrix} \neq 0$ 时, 可确定 $\begin{cases} y = y(x), \\ z = z(x), \end{cases}$ 且有

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\frac{\partial(F, G)}{\partial(x, z)}}{\frac{\partial(F, G)}{\partial(y, z)}}, \quad \frac{dz}{dx} = -\frac{\frac{\partial(F, G)}{\partial(y, x)}}{\frac{\partial(F, G)}{\partial(y, z)}}$$

4. 二元函数的二阶泰勒公式: $f(x, y)$ 在点 (x_0, y_0) 处的二阶泰勒公式为: 其中 $\rho^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$.

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + (x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y})f(x_0, y_0) + \frac{1}{2!}(x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y})^2 f(x_0, y_0) + o(\rho^2).$$

2.2 空间解析几何

1. 空间曲线的切线与法平面:

曲线: $\begin{cases} F(x, y, z) = 0, \\ G(x, y, z) = 0. \end{cases}$ 当 $\frac{\partial(F, G)}{\partial(y, z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F}{\partial y} & \frac{\partial F}{\partial z} \\ \frac{\partial G}{\partial y} & \frac{\partial G}{\partial z} \end{vmatrix} \neq 0$ 时, 取 $\tau = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ F'_x & F'_y & F'_z \\ G'_x & G'_y & G'_z \end{vmatrix} = (A, B, C)$.

切线方程: $\frac{x-x_0}{A} + \frac{y-y_0}{B} + \frac{z-z_0}{C} = 0$. 法平面方程: $A(x-x_0) + B(y-y_0) + C(z-z_0) = 0$.

2. 旋转曲面: 曲线 $\Gamma: \begin{cases} F(x, y, z) = 0 \\ G(x, y, z) = 0 \end{cases}$ 绕直线 $L: \frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p}$ 旋转一周形成的一个旋转曲面:

设 $M_0(x_0, y_0, z_0)$, 方向向量 $\mathbf{s} = (m, n, p)$. 在母线 Γ 上任取一点 $M_1(x_1, y_1, z_1)$, 则过 M_1 的纬圆上的任意一点 $P(x, y, z)$ 满足条件 $\overrightarrow{M_1 P} \perp \mathbf{s}, |\overrightarrow{M_0 P}| = |\overrightarrow{M_0 M_1}|$, 即

$$\text{联立} \begin{cases} m(x-x_1) + n(y-y_1) + p(z-z_1) = 0, \\ (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 = (x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2 + (z_1-z_0)^2, \text{ 即得旋转曲面的方程。} \\ F(x_1, y_1, z_1) = 0, G(x_1, y_1, z_1) = 0. \end{cases}$$

3. 场论:

1) 方向导数: 设三元函数 $u = u(x, y, z)$ 在点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的某空间邻域 $U \subset \mathbf{R}^3$ 内有定义, l 为从点 P_0 出发的射线, $P(x, y, z)$ 为 l 上且在 U 内的任一点, 以 $t = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$ 表示 P 与 P_0 之间的距离.

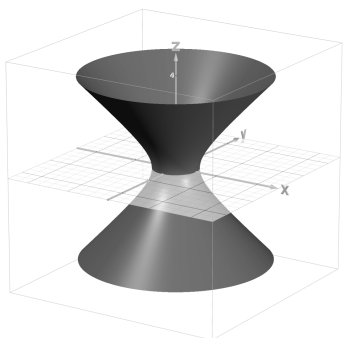
若极限 $\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{u(P) - u(P_0)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{u(x_0 + t \cos \alpha, y_0 + t \cos \beta, z_0 + t \cos \gamma) - u(x_0, y_0, z_0)}{t}$ 存在, 则称此极限为函数 $u = u(x, y, z)$ 在点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 处沿方向 l 的方向导数.

计算: $\left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_{P_0} = u'_x(P_0) \cos \alpha + u'_y(P_0) \cos \beta + u'_z(P_0) \cos \gamma$, 其中 $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 为方向 l 的方向余弦.

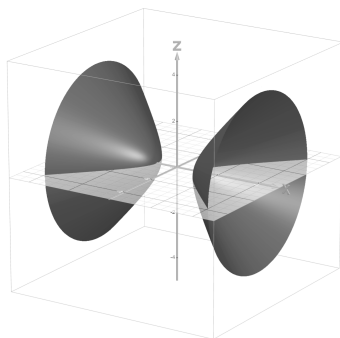
2) 梯度: $\mathbf{grad} u|_{P_0} = (u'_x(P_0), u'_y(P_0), u'_z(P_0))$, 函数在某点处的梯度是一个向量, 它的方向与取得最大方向导数的方向一致, 它的模为方向导数最大值. $|\mathbf{grad} u| = \sqrt{(u'_x)^2 + (u'_y)^2 + (u'_z)^2}$.

3) 散度: $\operatorname{div} \mathbf{A} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z}$; 旋度: $\operatorname{rot} \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix}$.

4. 双曲面: 注意区分



单叶双曲面 $x^2 + y^2 - z^2 = 1$



双叶双曲面 $x^2 - y^2 - z^2 = 1$

2.3 多元函数积分学

换元法: 取 $\begin{cases} x = x(u, v, \omega), \\ y = y(u, v, \omega), \\ z = z(u, v, \omega). \end{cases}$ 其中 $\frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, \omega)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial \omega} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial \omega} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial \omega} \end{vmatrix} \neq 0$, 则

$$\iiint_{\Omega_{xyz}} f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{\Omega_{uvw}} f[x(u, v, \omega), y(u, v, \omega), z(u, v, \omega)] \left| \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(u, v, \omega)} \right| du dv d\omega.$$

1. 第一型曲线积分: 边界方程可带入被积函数

1) 空间情形: 空间曲线 L 由参数式给出 $\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), (\alpha \leq t \leq \beta) \\ z = z(t). \end{cases}$ 则 $ds = \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt$, 且

$$\int_{\Gamma} f(x, y, z) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f[x(t), y(t), z(t)] \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt$$

2) 平面情形:

a. 平面曲线 L 由 $y = y(x) (a \leq x \leq b)$ 给出, 则 $ds = \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx$, 且

$$\int_L f(x, y) ds = \int_a^b f[x, y(x)] \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx.$$

b. 平面曲线 L 由参数式 $\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t). \end{cases} (\alpha \leq t \leq \beta)$ 给出, 则 $ds = \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt$, 且

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f[x(t), y(t)] \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt.$$

c. 平面曲线由极坐标形式 $r = r(\theta) (\alpha \leq \theta \leq \beta)$ 给出, 则 $ds = \sqrt{[r(\theta)]^2 + [r'(\theta)]^2} d\theta$, 且

$$\int_L f(x, y) ds = \int_{\alpha}^{\beta} f(r(\theta) \cos \theta, r(\theta) \sin \theta) \sqrt{[r(\theta)]^2 + [r'(\theta)]^2} d\theta.$$

2018-12 设 L 为球面 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 与平面 $x + y + z = 0$ 的交线, 则 $\oint_L xy ds = -\frac{\pi}{3}$.

$$\oint_L = \frac{1}{6} \oint_L [(x + y + z)^2 - (x^2 + y^2 + z^2)] ds.$$

24 超越 3-2 曲线 $L: x^2 + y^2 = -2y$, 则曲线积分 $\oint_L \sqrt{x^2 + y^2} ds = \underline{8}$.

24 李林 6-2-14 曲线 $L: \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = 1, \\ y + z = 0. \end{cases}$ 则 $I = \int_L (x^2 + 2y + 2z) ds = \int_L x^2 ds = \underline{\pi}$.

注意轮换对称性条件

2. 第一型曲面积分: 边界方程可带入被积函数

- 1) 一投: 将曲面 Σ 投影到某一平面 (如 xOy 面) 上 \Rightarrow 投影区域为 D (如 D_{xy});
- 2) 二代: 将 $z = z(x, y)$ 或 $F(x, y, z) = 0$ 代入 $f(x, y, z)$;
- 3) 三计算: 计算 z'_x, z'_y , 得 $dS = \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dxdy$, 得到

$$\iint_{\Sigma} f(x, y, z) dS = \iint_{D_{xy}} f[x, y, z(x, y)] \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dxdy.$$

3. 第二型曲线积分:

- 1) 化为定积分: 平面有向曲线 L 由参数方程 $\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t). \end{cases} (t: \alpha \rightarrow \beta)$ 给出, 则

$$\int_L P(x, y) dx + Q(x, y) dy = \int_{\alpha}^{\beta} \{Px'(t) + Qy'(t)\} dt.$$

- 2) 格林公式: 设平面有界闭区域 D 由分段光滑曲线 L 围成, 则

$$\oint_L P(x, y) dx + Q(x, y) dy = \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) d\sigma$$

- a. 曲线封闭且无奇点在内部, 直接用公式;
- b. 曲线封闭但有奇点在内部, 且除奇点外 $\frac{\partial Q}{\partial x} \equiv \frac{\partial P}{\partial y}$, 则换路径;
- c. 非封闭曲线且 $\frac{\partial Q}{\partial x} \equiv \frac{\partial P}{\partial y}$, 则换路径;
- d. 非封闭曲线且 $\frac{\partial Q}{\partial x} \neq \frac{\partial P}{\partial y}$, 可补线使其封闭.

24 张八-1-4 被积函数为积分区域正向边界时值最大。

积分区域不是单连通区域时, $\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} \nRightarrow \int_L Pdx + Qdy$ 与路径无关。

- 3) 两类曲线积分的关系: 其中 $(\cos \alpha, \sin \beta)$ 为 L 上点 (x, y) 处与 L 同向的单位切向量:

$$\int_L Pdx + Qdy = \int_L (P \cos \alpha + Q \sin \beta) ds.$$

- 4) 空间问题:

- a. 直接计算: 设 $\Gamma: \begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), t: \alpha \rightarrow \beta, \\ z = z(t). \end{cases}$ 则有 $\int_{\Gamma} Pdx + Qdy + Rdz = \int_{\alpha}^{\beta} [Px'(t) + Qy'(t) + Rz'(t)] dt.$

- b. 斯托克斯公式: 设 Ω 为某空间区域, Σ 为 Ω 内的分片光滑有向曲面片, Γ 为逐段光滑的 Σ 的边界, 则有

$$\oint_{\Gamma} Pdx + Qdy + Rdz = \iint_{\Sigma} \begin{vmatrix} dydz & dzdx & dxdy \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix} \quad (\text{第二型曲面积分形式})$$

若 $\text{rot} \mathbf{F} = 0$, 可换路径。

4. 第二型曲面积分:

- 1) 化为二重积分: 拆成三个积分

2) 转换投影法: 若 Σ 投影到 xOy 平面上不是一条线, 并且 Σ 上任意两点到 xOy 平面上的投影不重合, 则可将 Σ 投影到 xOy 平面, 设投影域为 D_{xy} , 曲面方程写成 $z = z(x, y)$ 的形式, 则有

$$\iint_{\Sigma} P(x, y, z) dydz + Q(x, y, z) dzdx + R(x, y, z) dxdy = \iint_{D_{xy}} \left[P \left(-\frac{\partial z}{\partial x} \right) + Q \left(-\frac{\partial z}{\partial y} \right) + R \right] dxdy.$$

$$\iint_{\Sigma} P(x, y, z) dydz + Q(x, y, z) dzdx + R(x, y, z) dxdy = \iint_{D_{xz}} \left[P \left(-\frac{\partial y}{\partial x} \right) + Q + R \left(-\frac{\partial y}{\partial z} \right) \right] dzdx.$$

$$\iint_{\Sigma} P(x, y, z) dydz + Q(x, y, z) dzdx + R(x, y, z) dxdy = \iint_{D_{yz}} \left[P + Q \left(-\frac{\partial x}{\partial y} \right) + R \left(-\frac{\partial x}{\partial z} \right) \right] dydz.$$

3) 高斯公式: 设空间有界闭区域 Ω 由分段光滑曲面 Σ 围成, 则

$$\oiint_{\Sigma} Pdydz + Qdzdx + Rdxdy = \iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dv.$$

a. 封闭曲面且内部无奇点, 直接用公式;

b. 封闭曲面, 有奇点在内部, 且除奇点外 $\operatorname{div} \mathbf{F} = 0$, 换个面积分;

c. 非封闭曲面, 且 $\operatorname{div} \mathbf{F} = 0$, 换个面积分;

d. 非封闭曲面, 且 $\operatorname{div} \mathbf{F} \neq 0$, 补面使其封闭。

4) 两类曲面积分的关系: 其中 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 为 Σ 在点 (x, y, z) 处与 Σ 同侧的单位法向量。

$$\iint_{\Sigma} Pdydz + Qdzdx + Rdxdy = \iint_{\Sigma} (P \cos \alpha + Q \cos \beta + R \cos \gamma) dS.$$

5. 应用:

1) 弧长: $l = \int_L ds = \int_a^b \sqrt{1 + (y'_x)^2} dx.$

2) 曲面面积: $S = \iint_{\Sigma} dS = \iint_{D_{xy}} \sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2} dxdy.$

3) 曲顶柱体体积: $V = \iint_{D_{xy}} |z(x, y)| d\sigma.$

4) 转动惯量: 空间物体 Ω , 对 x 轴、原点 O 的转动惯量:

$$I_x = \iiint_{\Omega} (y^2 + z^2) \rho(x, y, z) dv, \quad I_O = \iiint_{\Omega} (x^2 + y^2 + z^2) \rho(x, y, z) dv.$$

3 微分方程

3.1 一阶微分方程

1. $y' + p(x)y = q(x)$, 则 $y = e^{-\int p(x)dx} \left[\int e^{\int p(x)dx} \cdot q(x)dx + C \right]$.
2. 伯努利方程: $y' + p(x)y = q(x)y^n$, 令 $z = y^{1-n}$, 得 $\frac{dz}{dx} = (1-n)y^{-n}\frac{dy}{dx}$, 则 $\frac{1}{n-1}\frac{dz}{dx} + p(x)z = q(x)$.

3.2 二阶可降阶的微分方程

1. $y'' = f(x, y')$: 令 $y' = p, y'' = p'$, 则 $\frac{dp}{dx} = f(x, p)$.
2. $y'' = f(y, y')$: 令 $y' = p, y'' = \frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{dp}{dy} \cdot p$, 则 $p \frac{dp}{dy} = f(y, p)$.

3.3 高阶常系数线性微分方程

1. $y'' + py' + qy = f(x)$ 特解

微分算子: $y^* = \frac{1}{F(D)}f(x)$

1) $\frac{1}{F(D)}e^{\alpha x}$:

若 $F(D)|_{D=\alpha} \neq 0$, 有 $y^* = \frac{1}{F(D)}e^{\alpha x} = \frac{1}{F(D)|_{D=\alpha}}e^{\alpha x}$.

若 $F(D)|_{D=\alpha} = 0$, 而 $F'(D)|_{D=\alpha} \neq 0$, 有 $y^* = \frac{1}{F(D)}e^{\alpha x} = x \frac{1}{F'(D)|_{D=\alpha}}e^{\alpha x}$.

若 $F(D)|_{D=\alpha} = F'(D)|_{D=\alpha} = 0$, 而 $F''(D)|_{D=\alpha} \neq 0$, 有 $y^* = \frac{1}{F(D)}e^{\alpha x} = x^2 \frac{1}{F''(D)|_{D=\alpha}}e^{\alpha x}$.

2) $\frac{1}{F(D^2)}\cos \beta x$ 或 $\frac{1}{F(D^2)}\sin \beta x$:

若 $F(D^2)|_{D=\beta i} \neq 0$, 有 $y^* = \frac{1}{F(D^2)}\cos \beta x = \frac{1}{F(D^2)|_{D=\beta i}}\cos \beta x$.

若 $F(D^2)|_{D=\beta i} = 0$, 有 $y^* = \frac{1}{F(D^2)}\cos \beta x = x \frac{1}{[F(D^2)]'}\cos \beta x$.

3) $\frac{1}{F(D)}(x^k + a_1x^{k-1} + \cdots + a_{k-1}x + a_k)$: $y^* = Q_k(D)(x^k + a_1x^{k-1} + \cdots + a_{k-1}x + a_k)$.

4) $\frac{1}{F(D)}e^{\alpha x}v(x)$: $y^* = \frac{1}{F(D)}e^{\alpha x}v(x) = e^{\alpha x} \frac{1}{F(D+\alpha)}v(x)$.

2. 欧拉方程: $x^2y'' + pxy' + qy = f(x)$, $x < 0$ 时, 令 $x = -e^t$.

$x > 0$ 时, 令 $x = e^t$, 则 $\frac{dt}{dx} = \frac{1}{x}$, $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{x} \frac{dy}{dt}$, $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{x^2} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{x^2} \frac{d^2y}{dt^2}$ 即 $\frac{d^2y}{dt^2} + (p-1)\frac{dy}{dt} + qy = f(e^t)$.

3.4 n 阶常系数齐次线性微分方程的解

1. λ 为单实根, $Ce^{\lambda x}$.
2. λ 为重实根, $(C_1 + C_2x + C_3x^2 + \cdots + C_kx^{k-1})e^{\lambda x}$.
3. λ 为单复根 $\alpha + \beta i$, $e^{\alpha x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$.
4. λ 为二重复根 $\alpha + \beta i$, $e^{\alpha x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3x \cos \beta x + C_4x \sin \beta x)$.

24 李林 6-2-17 $\frac{dy}{dx} = \pm \frac{\sqrt{y^2-1}}{2} \Rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2-4}} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{y}{4} \Rightarrow y = C_1 e^{\frac{1}{2}} + C_2 e^{-\frac{1}{2}}$.

4 无穷级数

4.1 判敛法

1. 比较判别法: p 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} \begin{cases} \text{收敛, } p > 1, \\ \text{发散, } p \leq 1. \end{cases}$ 广义 p 级数 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n(\ln n)^p} \begin{cases} \text{收敛, } p > 1, \\ \text{发散, } p \leq 1. \end{cases}$
2. 常用结论: 设 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 则 $\begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} (u_{2n-1} + u_{2n}) \text{ 收敛,} \\ \sum_{n=1}^{\infty} (u_{2n-1} - u_{2n}) \text{ 不定.} \end{cases} \quad \begin{cases} \sum_{n=1}^{\infty} (u_n + u_{n+1}) \text{ 收敛,} \\ \sum_{n=1}^{\infty} (u_n - u_{n+1}) \text{ 收敛.} \end{cases}$

2023-04 已知 $a_n < b_n (n = 1, 2, \dots)$, 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 与 $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 均收敛, 则 “ $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ 绝对收敛” 是 “ $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ 绝对收敛” 的充要条件。由题意 $\sum_{n=1}^{\infty} (b_n - a_n)$ 为正项级数且绝对收敛, 由三角不等式得 $|b_n| = |b_n - a_n + a_n| \leq |b_n - a_n| + |a_n|$, $|a_n| = |a_n - b_n + b_n| \leq |b_n - a_n| + |b_n|$, 即为充要条件。

4.2 幂级数

1. 收敛域: 比值法和根值法只是计算幂级数收敛半径的充分条件, 而不是必要条件。

记 $\sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n$ 的收敛半径为 R , $\sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} x^{2n}$ 的收敛半径为 R_1 , 则 $R_1 \geq R$. 若 $\sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} r^{2n}$ 发散, 则 $|r| \geq R_1 \geq R$.

2. 和函数: 直接套公式、先积后导或先导后积; 用所给微分方程求和、建立微分方程求和。

$$\begin{aligned} \ln(1+x) &= \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n}, \quad -1 < x \leq 1. & e^x &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}, \quad -\infty < x < +\infty. \\ (\arctan x)' &= \frac{1}{1+x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n}, \quad -1 \leq x \leq 1. & e^{-x} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n!}, \quad -\infty < x < +\infty. \\ \sin x &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad -\infty < x < +\infty. & \frac{e^x + e^{-x}}{2} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!}, \quad -\infty < x < +\infty. \\ \cos x &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!}, \quad -\infty < x < +\infty. & \frac{e^x - e^{-x}}{2} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad -\infty < x < +\infty. \end{aligned}$$

4.3 傅里叶级数

1. 周期为 $2l$ 的傅里叶级数: $f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi}{l} x + b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \right)$.

$$a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{n\pi}{l} x dx, (n = 0, 1, 2, \dots), \quad b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{n\pi}{l} x dx, (n = 1, 2, 3, \dots).$$

$$2. \text{狄利克雷收敛定理: } S(x) = \begin{cases} f(x), & x \text{ 为连续点,} \\ \frac{f(x-0) + f(x+0)}{2}, & x \text{ 为间断点,} \\ \frac{f(-l+0) + f(l-0)}{2}, & x = \pm l. \end{cases}$$

3. 只在 $[0, l]$ 上有定义的函数的正弦级数和余弦级数展开:

$$1) \text{ 正弦级数: } f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi}{l} x, x \in [0, l], \quad b_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{n\pi}{l} x dx (n = 1, 2, 3, \dots).$$

$$2) \text{ 余弦级数: } f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi}{l} x, x \in [0, l], \quad a_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cos \frac{n\pi}{l} x dx (n = 0, 1, 2, \dots).$$

5 线性代数

5.1 行列式和矩阵

- 代数余子式 $A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$, 行列式: $|A| = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \cdots + a_{in}A_{in} = \sum_{j=1}^n a_{ij}A_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$.
- 矩阵的初等变换: “左行右列”。

1. 设 A 是 $m \times n$ 矩阵, B 是 $n \times s$ 矩阵, E 是 n 阶单位矩阵:

1) 若 $r(A) = n$ (列满秩), 则 $r(AB) = r(B)$; 若 $r(B) = n$ (行满秩), 则 $r(AB) = r(A)$.

2) $r(A) + r(B) - n \leq r(AB) \leq \min\{r(A), r(B)\}$.

2. 设 A, B 为同型矩阵, 则 $r(A+B) \leq r(A, B) \leq r(A) + r(B)$, $r(A, B) = r(A[E, B]) = r(A)$.

3. 设 A 是 $n(n > 2)$ 阶方阵, 则 $r(A) = r(A^T) = r(A^T A) = r(AA^T)$; 若 A 可逆, 则 $(A^*)^* = |A|^{n-2} A$.

分块矩阵秩的常用结论:

1) $r(A+B) \leq r(A, B) \leq r(A) + r(B)$, $r(A+B) \leq r \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \leq r(A) + r(B)$.

2) 当 A 可逆时, $r \begin{bmatrix} A & O \\ C & D \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} A & B \\ O & D \end{bmatrix} = r(A) + r(D)$.

3) $r \begin{bmatrix} A & O \\ O & B \end{bmatrix} = r(A) + r(B)$, $r \begin{bmatrix} O & A \\ B & O \end{bmatrix} = r(A) + r(B)$.

4) $r \begin{bmatrix} A & O \\ C & D \end{bmatrix} \geq r(A) + r(D)$, $r \begin{bmatrix} A & B \\ O & D \end{bmatrix} \geq r(A) + r(D)$.

5.2 向量组

1. 等价向量组: $r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) = r(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t) = r(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t)$.

2. 基坐标: 向量空间 V 中的任一向量 ξ 都可由这个基唯一地线性表示: $\xi = x_1\alpha_1 + x_2\alpha_2 + \cdots + x_r\alpha_r$. 称有序数组 x_1, x_2, \dots, x_r 为向量 ξ 在基 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ 下的坐标.

3. 过渡矩阵: 设 V 的两个基 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n; \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, 若 $[\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n] = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]C$. 称 C 为由基 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 到基 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 的过渡矩阵.

24 张八-2-7 n 维向量组 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 等价, 则

$$r(A) = r(B) = r(A, B) \Rightarrow r(A^T) = r(B^T) = r \begin{pmatrix} A^T \\ B^T \end{pmatrix} \Rightarrow A^T x = O, B^T x = O, \begin{pmatrix} A^T \\ B^T \end{pmatrix} x = O \text{ 同解.}$$

5.3 线性方程组

1. 公共解: 齐次线性方程组 $A_{m \times n}x = O$ 和 $B_{m \times n}x = O$ 的公共解即联立方程 $\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} x = O$ 的解.

2. 同解方程组: 两个方程组 $Ax = 0$ 和 $Bx = 0$ 有完全相同的解: $r(A) = r(B) = r \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}$ (三秩相同较方便)。

$$A_{m \times n}x = b \text{ 有解} \Leftrightarrow r(A) = r(A, b) \Leftrightarrow r(A^T) = r \begin{bmatrix} A^T \\ b^T \end{bmatrix} \Leftrightarrow A^T x = O \text{ 与 } \begin{bmatrix} A^T \\ b^T \end{bmatrix} x = O \text{ 同解.}$$

表 1: 线性方程组与空间平面、直线的关系

秩的情况	解的情况	位置关系
$r(\mathbf{A}) = 1, r(\mathbf{A} \mathbf{b}) = 1$	有无穷解	三平面重合
$r(\mathbf{A}) = 1, r(\mathbf{A} \mathbf{b}) = 2$	无解	三平面平行且三平面互异 两平面重合, 第三个平面与之平行
$r(\mathbf{A}) = 2, r(\mathbf{A} \mathbf{b}) = 2$	有无穷解	两平面相交, 第三个平面与其中一个平面重合 三平面互异, 相交于一条直线
$r(\mathbf{A}) = 2, r(\mathbf{A} \mathbf{b}) = 3$	无解	两平面平行, 第三个平面与这两个平面分别相交 三平面互不平行, 两两相交
$r(\mathbf{A}) = 3, r(\mathbf{A} \mathbf{b}) = 3$	有唯一解	三平面相交于一点

相似矩阵: 设 \mathbf{A}, \mathbf{B} 是 n 阶矩阵, 若 $\mathbf{A} \sim \mathbf{B}$, 则 $\mathbf{A}^T \sim \mathbf{B}^T, \mathbf{A}^* \sim \mathbf{B}^*, \mathbf{A}^{-1} \sim \mathbf{B}^{-1}, \mathbf{A}^m \sim \mathbf{B}^m, f(\mathbf{A}) \sim f(\mathbf{B})$.
若 \mathbf{A}, \mathbf{B} 可逆, 则 $\mathbf{AB} \sim \mathbf{BA}$.

5.4 特征值与特征向量

表 2: 特征值及其对应的特征向量

矩阵	\mathbf{A}	$k\mathbf{A}$	\mathbf{A}^k	$f(\mathbf{A})$	\mathbf{A}^{-1}	\mathbf{A}^*	$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{B}$	$\mathbf{P}^{-1}f(\mathbf{A})\mathbf{P} = \mathbf{B}$
特征值	λ	$k\lambda$	λ^k	$f(\lambda)$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{ \mathbf{A} }{\lambda}$	λ	$f(\lambda)$
对应的特征向量	ξ	ξ	ξ	ξ	ξ	ξ	$\mathbf{P}^{-1}\xi$	$\mathbf{P}^{-1}\xi$

1. 迹数: 矩阵 \mathbf{A} 的对角线元素之和, 等于特征值总和. $\text{tr}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

2. 反对称矩阵: $\mathbf{A}^T = -\mathbf{A} (a_{ij} = -a_{ji}), r(\mathbf{A}_{3 \times 3}) = 2$.

5.5 二次型

1. n 元二次型 $f = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 正定 $\Leftrightarrow \forall \mathbf{x} \neq 0, \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} > 0 \Leftrightarrow \mathbf{A}$ 的特征值 $\lambda_i > 0 \Leftrightarrow f$ 的正惯性指数 $p = n$
 $\Leftrightarrow \exists \mathbf{D}$ 可逆, $\mathbf{A} = \mathbf{D}^T \mathbf{D} \Leftrightarrow \mathbf{A}$ 与 \mathbf{E} 合同 $\Leftrightarrow \mathbf{A}$ 的各阶顺序主子式均大于 0.

2. 同阶方阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 合同的判定:

1) \mathbf{A}, \mathbf{B} 合同 \Leftrightarrow 存在可逆矩阵 \mathbf{C} , 使得 $\mathbf{C}^T \mathbf{A} \mathbf{C} = \mathbf{B}$.

2) 实对称矩阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 的正负惯性指数相同。

3) 同阶实对称矩阵相似必合同。

24 张 4-2-07 二次型 $f(x_1, x_2, x_3) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 与 $g(y_1, y_2, y_3) = \mathbf{y}^T \mathbf{B} \mathbf{y}$.

若存在可逆线性变换将 f 化为 g , 则 \mathbf{A}, \mathbf{B} 合同; 若不存在正交变换将 f 化为 g , 则 \mathbf{A}, \mathbf{B} 不相似。

2012-13 设 α 为 3 维列向量, \mathbf{E} 为 3 阶单位矩阵, 则矩阵 $\mathbf{E} - \alpha\alpha^T$ 的秩为: 2.

取 $\mathbf{A} = \mathbf{E} - \alpha\alpha^T$, $\mathbf{A}^2 = \mathbf{A} = (\mathbf{E} - \alpha\alpha^T)(\mathbf{E} - \alpha\alpha^T) = \mathbf{E} - \alpha\alpha^T = \mathbf{A}$, 即 $\mathbf{A}(\mathbf{E} - \mathbf{A}) = \mathbf{O}$, 则

$$\begin{cases} r(\mathbf{A}) + r(\mathbf{E} - \mathbf{A}) \geq 3, \\ r(\mathbf{A}) + r(\mathbf{E} - \mathbf{A}) \leq 3. \end{cases}$$
所以 $r(\mathbf{A}) + r(\mathbf{E} - \mathbf{A}) = 3$, 又 $r(\mathbf{E} - \mathbf{A}) = r(\alpha\alpha^T) = 1$, 即 $r(\mathbf{E} - \alpha\alpha^T) = 2$.

或者: $\begin{cases} (\alpha\alpha^T)\alpha = \alpha \Rightarrow \lambda_1 = 1, \\ r(\alpha\alpha^T) = 1. \end{cases} \Rightarrow \alpha\alpha^T \sim \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow (\mathbf{E} - \alpha\alpha^T) \sim \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}.$

6 概率论与数理统计

6.1 随机变量

1. 随机变量概率分布及其数字特征:

表 3: 一维随机变量概率分布及其数字特征

分布	概率密度/概率分布	均值	方差
泊松分布	$P\{X = k\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} (k = 0, 1, \dots)$	$EX = \lambda$	$DX = \lambda$
几何分布	$P\{X = k\} = p(1-p)^{k-1} (k = 1, 2, \dots)$	$EX = \frac{1}{p}$	$DX = \frac{1-p}{p^2}$
均匀分布	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{else} \end{cases}$	$EX = \frac{a+b}{2}$	$DX = \frac{(b-a)^2}{12}$
指数分布	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$	$EX = \frac{1}{\lambda}$	$DX = \frac{1}{\lambda^2}$
正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$EX = \mu, E X - \mu = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma$	$DX = \sigma^2$

1. 分布函数: $F(x)$ 是分布函数 $\Leftrightarrow F(x)$ 是 x 的单调不减、右连续函数, 且 $F(-\infty) = 0, F(+\infty) = 1$.
2. 若随机变量 X 分布函数 $F_X(x)$ 严格单调增加, 反函数 $F_X^{-1}(y)$ 存在, 则 $Y = F_X(X) \sim U(0, 1)$.
3. 泊松定理: 若 $X \sim B(n, p)$, 当 n 很大, p 很小, $\lambda = np$ 适中时, 可用泊松分布近似表示, 即 $X \sim P(\lambda)$.
4. 设 X 为离散型随机变量, 分布律为 $P\{X = a_i\} = p_i (i = 1, 2, \dots)$, 则数学期望 EX 存在的:
充分条件: $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 p_n$ 收敛, 必要条件: $\sum_{n=1}^{\infty} a_n p_n$ 收敛.

2. 二维正态分布: (X, Y) 服从参数为 $\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \rho$ 的二维正态分布, 记为 $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho)$.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1} \right) \left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right) + \left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] \right\}.$$

24 超越 1-22 $(X_1, X_2) \sim N, \begin{cases} Y_1 = a_1 X_1 + a_2 X_2 \\ Y_2 = b_1 X_1 + b_2 X_2 \end{cases}, \text{ 且 } \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \neq 0 \Rightarrow (Y_1, Y_2) \sim N.$

3. 卷积公式: 设 $(X, Y) \sim f(x, y)$

- 1) $Z = X + Y$ 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, z-x) dx \stackrel{\text{独立}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx.$$

- 2) $Z = X - Y$ 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, x-z) dx \stackrel{\text{独立}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) f_Y(x-z) dx.$$

- 3) $Z = XY$ 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|x|} f\left(x, \frac{z}{x}\right) dx \stackrel{\text{独立}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|y|} f_X\left(\frac{z}{y}\right) f_Y(y) dy.$$

- 4) $Z = \frac{X}{Y}$ 的概率密度函数为

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} |y| f(yz, y) dy \stackrel{\text{独立}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} |y| f_X(yz) f_Y(y) dy.$$

$$\max(X, Y) = \frac{1}{2}(X + Y + |X - Y|), \quad \min(X, Y) = \frac{1}{2}(X + Y - |X - Y|).$$

4. 切比雪夫不等式: 设随机变量 X 的 EX 与 DX 均存在, 则

$$\forall \varepsilon > 0, P\{|X - EX| \geq \varepsilon\} \leq \frac{DX}{\varepsilon^2} \text{ 或 } P\{|X - EX| < \varepsilon\} \geq 1 - \frac{DX}{\varepsilon^2}.$$

设随机变量 $X \sim B(n, p), Y = e^X - 2$, 则 $EY = [(e-1)p + 1]^n - 2$.

$$\begin{aligned} EY &= \sum_{k=0}^n (e^k - 2) \cdot C_n^k p^k (1-p)^{n-k} = \sum_{k=0}^n C_n^k (ep)^k (1-p)^{n-k} - 2 \sum_{k=0}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \\ &= (ep + 1 - p)^n - 2(p + 1 - p)^n = (ep + 1 - p)^n - 2 = [(e-1)p + 1]^n - 2. \end{aligned}$$

5. 相关系数: $Y = aX + b: a > 0 \Rightarrow \rho_{XY} = 1, a < 0 \Rightarrow \rho_{XY} = -1$.

独立和相关性的判断:

1. X, Y 独立 $\Rightarrow X, Y$ 不相关, 反之不; X, Y 相关 $\Rightarrow X, Y$ 不独立。
2. (X, Y) 服从二维正态分布, 则 X, Y 独立 $\Leftrightarrow X, Y$ 不相关。
3. X, Y 均服从 0-1 分布, 则 X, Y 独立 $\Leftrightarrow X, Y$ 不相关。

24 超越 5-10 设 $(X, Y) \sim N(\mu_1, \mu_2; \sigma_1^2, \sigma_2^2; \rho), U = X + Y, V = X - Y$, U 与 V 独立的充要条件为 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$.
(U, V) 服从二维正态分布, 则 U, V 独立 $\Leftrightarrow U, V$ 不相关 $\Leftrightarrow Cov(U, V) = DX - DY = 0 \Leftrightarrow \sigma_1^2 = \sigma_2^2$.

6.2 大数定理与中心极限定理

中心极限定理: 设 X_i 独立同分布于某一分布, 期望、方差均存在, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\sum_{i=1}^n X_i$ 服从正态分布, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} \leq x\right\} = \Phi(x).$$

6.3 统计量及其分布

1. χ^2 分布: 若随机变量 X_1, X_1, \dots, X_n 相互独立, 且都服从标准正态分布, 则随机变量 $X = \sum_{i=1}^n X_i^2$ 服从自由度为 n 的 χ^2 分布. $P\{\chi^2 > \chi_\alpha^2(n)\} = \alpha, EX = n, DX = 2n$.

常见分布的可加性:

1. 二项分布: $X \sim B(n, p), Y \sim B(m, p) \Rightarrow X + Y \sim B(n + m, p)$.
2. 泊松分布: $X \sim P(\lambda_1), Y \sim P(\lambda_2) \Rightarrow X + Y \sim P(\lambda_1 + \lambda_2)$.
3. 正态分布: $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2), Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2) \Rightarrow X + Y \sim N(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$.
4. χ^2 分布: $X \sim \chi^2(n), Y \sim \chi^2(m) \Rightarrow X + Y \sim \chi^2(n + m)$.

2. t 分布: 设随机变量 $X \sim N(0, 1), Y \sim \chi^2(n)$, X 与 Y 相互独立, 则随机变量 $t = \frac{X}{\sqrt{Y/n}}$ 服从自由度为 n 的 t 分布. $P\{t > t_\alpha(n)\} = \alpha, Et = 0$.

3. F 分布: 设随机变量 $X \sim \chi^2(n_1), Y \sim \chi^2(n_2)$, 且 X 与 Y 相互独立, 则 $F = \frac{X/n_1}{Y/n_2}$ 服从自由度为 (n_1, n_2) 的 F 分布. $P\{F > F_\alpha(n_1, n_2)\} = \alpha, F \sim F(n_1, n_2) \Rightarrow \frac{1}{F} \sim F(n_2, n_1)$, 若 $t \sim t(n)$, 则 $t^2 \sim F(1, n)$.

4. 正态总体下的常用结论: 设 X_1, X_2, \dots, X_n 是取自正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$ 的一个样本, \bar{X}, S^2 分别是样本均值和样本方差, \bar{X} 与 S^2 相互独立, 则

$$\begin{aligned}\bar{X} &\sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right) \Rightarrow \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{\sigma} \sim N(0, 1) \Rightarrow \frac{n(\bar{X} - \mu)^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(1), \quad \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu}{\sigma}\right)^2 \sim \chi^2(n). \\ \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}\right)^2 \sim \chi^2(n-1), \quad \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu)}{S} \sim t(n-1) \Rightarrow \frac{n(\bar{X} - \mu)^2}{S^2} \sim F(1, n-1).\end{aligned}$$

设 X_1, X_2 为来自总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 的简单随机样本, $(X_1 + X_2)^2$ 与 $(X_1 - X_2)^2$ 相互独立:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{2}, \quad S^2 = (X_1 - \frac{X_1 + X_2}{2})^2 + (X_2 - \frac{X_1 + X_2}{2})^2 = \frac{(X_1 - X_2)^2}{2},$$

\bar{X} 与 S^2 相互独立, 故 $(X_1 + X_2)^2$ 与 $(X_1 - X_2)^2$ 相互独立。

6.4 参数估计与假设检验

1. 矩估计:

1) 一个参数, 用一阶矩建方程, 令 $\bar{X} = EX$, 若一阶矩为 $\mathbf{0}$, 用二阶矩建方程, 令 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 = E(X^2)$.

2) 两个参数, 用一阶矩和二阶矩建立两个方程.

2. 最大似然估计: 写似然函数 $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta)$ 或 $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$.

1) 若似然函数有驻点, 令 $\frac{dL}{d\theta}$ 或 $\frac{d \ln L}{d\theta} = 0$, 解出 $\hat{\theta}$; 2) 若似然函数无驻点 (单调), 或为常数, 用定义求 $\hat{\theta}$.

24 超越 6-22 X 的概率密度为 $f(x) = \begin{cases} bx, & 0 \leq x < 1, \\ ax, & 1 \leq x < 2. \end{cases}$ 测得样本观察值为 0.5, 0.8, 1.5, 1.5. 则 a 与 b 的最

大似然估计为 $\hat{a} = \frac{1}{3}, \hat{b} = 1$.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \Rightarrow b = 2 - 3a. \quad L = 0.5b \cdot 0.8b \cdot (1.5a)^2 \Rightarrow \frac{d \ln L}{da} = \frac{2}{a} - \frac{6}{2 - 3a} = 0 \Rightarrow \hat{a} = \frac{1}{3}, \hat{b} = 1.$$

3. 估计量的评价:

1) 无偏性: $E\hat{\theta} = \theta$; 2) 有效性: $E\hat{\theta}_1 = \theta, E\hat{\theta}_2 = \theta$, 即均是无偏估计量, 当 $D\hat{\theta}_1 < D\hat{\theta}_2 = \theta$ 时, $\hat{\theta}_1$ 更有效.

3) 一致性 (相合性): $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\hat{\theta} - \theta| \geq \varepsilon\} = 0$ 或 $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\hat{\theta} - \theta| < \varepsilon\} = 1$.

4. 区间估计: 单个正态总体均值和方差的置信区间: 设 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 从总体 X 中抽取样本 X_1, X_2, \dots, X_n , 样本均值为 \bar{X} , 样本方差为 S^2 .

1) σ^2 已知, μ 的置信水平是 $1 - \alpha$ 的置信区间为: $\left(\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\frac{\alpha}{2}}, \bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\frac{\alpha}{2}}\right)$.

2) σ^2 未知, μ 的置信水平是 $1 - \alpha$ 的置信区间为: $\left(\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1), \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)\right)$.

3) μ 已知, σ^2 的置信水平是 $1 - \alpha$ 的置信区间为: $\left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n)}, \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n)}\right)$.

4) μ 未知, σ^2 的置信水平是 $1 - \alpha$ 的置信区间为: $\left(\frac{(n-1)S^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}, \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}\right)$.

5. 假设检验: 正态总体下的六大检验及拒绝域:

1) σ^2 已知, μ 未知, $H_0: \mu = \mu_0, H_1: \mu \neq \mu_0$, 拒绝域为 $\left(-\infty, \mu_0 - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\frac{\alpha}{2}}\right] \cup \left[\mu_0 + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\frac{\alpha}{2}}, +\infty\right)$.

2) σ^2 未知, μ 未知, $H_0: \mu = \mu_0, H_1: \mu \neq \mu_0$, 拒绝域为 $\left(-\infty, \mu_0 - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)\right] \cup \left[\mu_0 + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1), +\infty\right)$.

3) σ^2 已知, μ 未知, $H_0: \mu \leq \mu_0, H_1: \mu > \mu_0$, 拒绝域为 $\left[\mu_0 + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha}, +\infty\right)$.

4) σ^2 已知, μ 未知, $H_0: \mu \geq \mu_0, H_1: \mu < \mu_0$, 拒绝域为 $\left(-\infty, \mu_0 - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{\alpha}\right]$.

5) σ^2 未知, μ 未知, $H_0: \mu \leq \mu_0, H_1: \mu > \mu_0$, 拒绝域为 $\left[\mu_0 + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha}(n-1), +\infty\right)$.

6) σ^2 未知, μ 未知, $H_0: \mu \geq \mu_0, H_1: \mu < \mu_0$, 拒绝域为 $\left(-\infty, \mu_0 - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha}(n-1)\right]$.

6. 两类错误: 第一类错误 (弃真): $\alpha = P\{\text{拒绝 } H_0 | H_0 \text{ 为真}\}$; 第二类错误 (取伪): $\beta = P\{\text{接受 } H_0 | H_0 \text{ 为假}\}$.