

FDU 高等线性代数 Homework 02

Due: Sept. 14, 2024

姓名: 雍崔扬

学号: 21307140051

Problem 1

设 m, n 为正整数且 $m \geq n$, 给定列满秩矩阵 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 和向量 $b \in \mathbb{R}^m$.

试证明 \mathbb{R}^n 上的函数 $f(x) = \|b - Ax\|_2^2$ 的全局最小点为 $x_* = (A^T A)^{-1} A^T b$.

Solution:

$$\begin{aligned}\nabla f(x) &= \nabla_x \{\|b - Ax\|_2^2\} \\&= \nabla_x \{b - Ax\} \cdot 2(b - Ax) \\&= -A^T \cdot 2(b - Ax) \\&= -2(A^T b - A^T Ax) \\ \nabla^2 f(x) &= -2\nabla_x \{A^T b - A^T Ax\} \\&= -2(-A^T A)^T \\&= 2A^T A\end{aligned}$$

注意到 $\text{rank}(A) = n \leq m$ 保证了 $\nabla^2 f(x) = 2A^T A \succ 0 (\forall x \in \mathbb{R}^n)$.

因此 $f(x)$ 在 \mathbb{R}^n 上是严格凸函数, 其全局最小点是驻点(即令梯度为零的点), 且若存在则必定唯一.

令 $\nabla f(x) = -2(A^T b - A^T A)x = 0_n$ 即可解得全局最小点为 $x_* = (A^T A)^{-1} A^T b$.

(值得注意的是, A 列满秩的条件保证了 $A^T A$ 的正定性, 因此 $A^T A$ 是非奇异的)

Problem 2

设 n 为正整数, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是给定的实对称阵.

试求下列 $\mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ 的函数的梯度:

$$\begin{aligned}f(x) &= \text{tr}((A + xx^T)^2) \\g(x) &= \text{tr}((A + xx^T)^3)\end{aligned}$$

Solution:

首先求解 f 的梯度:

$$\begin{aligned}f(x) &= \text{tr}((A + xx^T)^2) \\&= \text{tr}(A^2 + xx^T A + Axx^T + x^T x x x^T) \\&= \text{tr}(A^2) + \text{tr}(xx^T A) + \text{tr}(Axx^T) + x^T x \text{tr}(x x^T) \\&= \text{tr}(A^2) + 2 \text{tr}(x^T A x) + x^T x \text{tr}(x^T x) \\&= \text{tr}(A^2) + 2x^T A x + (x^T x)^2 \\ \hline \nabla f(x) &= 2\nabla_x \{x^T A x\} + \nabla_x \{(x^T x)^2\} \\&= 2 \cdot (A + A^T)x + \nabla_x \{x^T x\} \cdot 2(x^T x) \quad (\text{note that } A^T = A) \\&= 4Ax + 2x \cdot 2(x^T x) \\&= 4(A + xx^T)x\end{aligned}$$

接下来求解 g 的梯度:

$$\begin{aligned}
g(x) &= \text{tr}((A + xx^T)^3) \\
&= \text{tr}(A^3 + xx^T A^2 + Ax x^T A + x^T x x x^T A + A^2 x x^T + x x^T A x x^T + A x x^T x x^T + (x^T x)^2 x x^T) \\
&= \text{tr}(A^3) + \text{tr}(x x^T A^2) + \text{tr}(A x x^T A) + \text{tr}(x^T x x x^T A) + \text{tr}(A^2 x x^T) + \text{tr}(x x^T A x x^T) \\
&\quad + \text{tr}(A x x^T x x^T) + \text{tr}((x^T x)^2 x x^T) \\
&= \text{tr}(A^3) + 3 \text{tr}(x^T A^2 x) + 3(x^T x) \text{tr}(x^T A x) + (x^T x)^2 \text{tr}(x^T x) \\
&= \text{tr}(A^3) + 3x^T A^2 x + 3(x^T x)(x^T A x) + (x^T x)^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\nabla g(x) &= 3\nabla_x\{x^T A^2 x\} + 3\nabla_x\{(x^T x)(x^T A x)\} + \nabla_x\{(x^T x)^3\} \\
&= 3(A^2 + (A^2)^T)x + 3((x^T x) \cdot \nabla_x\{x^T A x\} + \nabla_x\{x^T x\} \cdot (x^T A x)) + 3(x^T x)^2 \nabla_x\{x^T x\} \\
&= 3(A^2 + (A^2)^T)x + 3((x^T x) \cdot (A + A^T)x + 2x \cdot (x^T A x)) + 3(x^T x)^2 \cdot 2x \quad (\text{note that } A^T = A) \\
&= 6A^2 x + 6(x^T x)Ax + 6(x^T A x)x + 6(x^T x)^2 x \\
&= 6(A^2 + A x x^T + x x^T A + x x^T x x^T)x \\
&= 6(A + x x^T)^2 x
\end{aligned}$$

Problem 3

设 n 为正整数, $a, b \in \mathbb{R}^n$ 为给定的向量.

试求下列 $\mathbb{R}^{n \times n} \mapsto \mathbb{R}$ 的函数的梯度:

$$f(X) = a^T X^T X b.$$

邵老师提供的解法:

一般地, 我们有:

$$\nabla_X \text{tr}(AX) = \nabla_X \text{tr}(XA) = \nabla_X \text{tr}(A^T X^T) = \nabla_X \text{tr}(X^T A^T) = A^T.$$

特殊地, 我们有 $\nabla_X \text{tr}(X) = I$.

据此可推出:

$$\nabla_X a^T X b = \nabla_X \text{tr}(a^T X b) = \nabla_X \text{tr}(ba^T X) = \nabla_X \text{tr}(X^T ab^T) = \nabla_X b^T X^T a = ab^T.$$

一般来说, 我们有:

$$\nabla_X \text{tr}(AX^k) = \nabla_X \text{tr}(X^k A) = \sum_{i=0}^{k-1} (X^i A X^{k-1-i})^T.$$

现在我们计算 $f(X)$ 的梯度:

$$\begin{aligned}
\nabla_X f(X) &= \nabla_X \{a^T X^T X b\} \\
&= \nabla_X \{\text{tr}(a^T X^T X b)\} \\
&= \nabla_X \{\text{tr}(X^T X b a^T)\} \\
&= (\nabla_{X_1}\{\text{tr}(X_1^T X_2 b a^T)\} + \nabla_{X_2}\{\text{tr}(b a^T X_1^T X_2)\})|_{X_1=X_2=X} \\
&= (X_2 b a^T + (b a^T X_1^T)^T)|_{X_1=X_2=X} \\
&= X(b a^T + a b^T).
\end{aligned}$$

My Solution:

首先我们证明一个引理:

Lemma: $\nabla_Y \{a^T Y b\} = ab^T$ ($\forall Y = [y_{ij}] \in \mathbb{C}^{n \times n}$)

Proof:

$$\begin{aligned}
\nabla_Y \{a^T Y b\} &= \left[\frac{\partial(a^T Y b)}{\partial y_{ij}} \right]_{i,j=1}^n \\
&= \left[\frac{\partial}{\partial y_{ij}} \sum_{k,l=1}^n a_k y_{kl} b_l \right]_{i,j=1}^n \\
&= [a_i b_j]_{i,j=1}^n \\
&= ab^T
\end{aligned}$$

现在我们计算 $f(X)$ 的梯度:

$$\begin{aligned}
\nabla_X f(x) &= \nabla_X \{a^T X^T X b\} \\
&= [\nabla_{X_1} \{a^T X_1^T X_2 b\} + \nabla_{X_2} \{a^T X_1^T X_2 b\}] \Big|_{X_1=X_2=X} \\
&= [\nabla_{X_1} \{(X_2 b)^T X_1 a\} + \nabla_{X_2} \{(X_1 a) X_2 b\}] \Big|_{X_1=X_2=X} \quad (\text{utilizing Lemma: } \nabla_Y \{a^T Y b\} = ab^T) \\
&= [(X_2 b) a^T] + [(X_1 a) b^T] \Big|_{X_1=X_2=X} \\
&= X b a^T + X a b^T \\
&= X (b a^T + a b^T)
\end{aligned}$$

下面是另一种更繁难的解法:

(不幸的是, 这是我最开始想到的解法)

记 X 的行向量为 x_1^T, \dots, x_n^T , 记 X 的 (i, j) 位置元素为 x_{ij} .

定义 Kronecker δ -函数为:

$$\delta_{ij} := \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

则我们有:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(X^T X)_{kl}}{\partial x_{ij}} &= \frac{\partial}{\partial x_{ij}} \{x_k^T x_l\} \\
&= \frac{\partial}{\partial x_{ij}} \left\{ \sum_{m=1}^n x_{km} x_{lm} \right\} \\
&= \delta_{ik} x_{lj} + \delta_{il} x_{kj}
\end{aligned}$$

定义单位基矩阵 E_{ij} (它在 (i, j) 位置上为 1, 在其余位置为零).

注意到 $(E_{ij})_{kl} = \delta_{ik} \delta_{jl}$, 因此我们有:

$$\begin{aligned}
\nabla_{x_{ij}} \{X^T X\} &= \left[\frac{\partial(X^T X)_{kl}}{\partial x_{ij}} \right]_{k,l=1}^n \\
&= [\delta_{ik} x_{lj} + \delta_{il} x_{kj}]_{k,l=1}^n \\
&= [\delta_{ik} x_{lj}]_{k,l=1}^n + [\delta_{il} x_{kj}]_{k,l=1}^n \\
&= X^T E_{ij} + E_{ji} X.
\end{aligned}$$

记 e_i 为 \mathbb{C}^n 的标准单位基向量, 记 $a = [a_1, \dots, a_n]^T, b = [b_1, \dots, b_n]^T$.

回忆起 X 的行向量为 x_1^T, \dots, x_n^T , 于是我们有:

$$\begin{aligned}
\nabla f(X) &= \nabla_X \{a^T X^T X b\} \quad (\text{utilizing Lemma: } \nabla_Y \{a^T Y b\} = ab^T) \\
&= \nabla_X \{X^T X\} \cdot (ab^T) \quad (\text{note that } \nabla_X \{X^T X\} \in \mathbb{R}^{n \times n \times n \times n} \text{ is a four dimensional tensor}) \\
&= [a^T \nabla_{x_{ij}} \{X^T X\} b]_{i,j=1}^n \\
&= [a^T (X^T E_{ij} + E_{ji} X) b]_{i,j=1}^n \\
&= [a^T X^T E_{ij} b]_{i,j=1}^n + [a^T E_{ji} X b]_{i,j=1}^n \\
&= [a^T X^T b_j e_i]_{i,j=1}^n + [a_j e_i^T X b]_{i,j=1}^n \\
&= [b_j a^T x_i]_{i,j=1}^n + [a_j x_i^T b]_{i,j=1}^n \\
&= [(x_i^T a) b_j]_{i,j=1}^n + [(x_i^T b) a_j]_{i,j=1}^n \\
&= (Xa)b^T + (Xb)a^T \\
&= X(ab^T + ba^T).
\end{aligned}$$

Problem 4

定义 \mathbb{C}^2 上的实值函数 $\|\cdot\|_{1/2}$ 为 $\|x\|_{1/2} := (|x_1|^{\frac{1}{2}} + |x_2|^{\frac{1}{2}})^2$ ($\forall x \in \mathbb{C}^2$).

试证明 $\|\cdot\|_{1/2}$ 不是 \mathbb{C}^2 上的范数.

- 事实上, $\|\cdot\|_p$ ($0 < p < 1$) 都不是 \mathbb{C}^n 上的范数, 参见本次作业的 Problem 10.

(反 Minkowski 不等式)

给定 $0 < p < 1$ 和 $x, y \in \mathbb{C}^n$.

若存在 $\lambda_1, \dots, \lambda_n \geq 0$ 使得 $y_i = \lambda_i x_i$ ($\forall i = 1, \dots, n$),

则我们有 $\|x + y\|_p \geq \|x\|_p + \|y\|_p$ 成立.

这说明由 $\|x\|_p := (\sum_{i=1}^n |x_i|^p)^{1/p}$ ($\forall x \in \mathbb{C}^n$) 定义的函数 $\|\cdot\|_p$ 在 $p \in (0, 1)$ 时不是范数.

证明过程参见 "FDU 高等线性代数 2. 范数 & 内积", 搜索关键词 "反 Minkowski 不等式".

Solution:

我们只要举例说明 $\|\cdot\|_{1/2}$ 不满足三角不等式即可.

根据反 Minkowski 不等式的指导(需要避开取等条件), 我们可以构造如下反例:

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad x + y = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \|x + y\|_{1/2} - \|x\|_{1/2} - \|y\|_{1/2} &= (\sqrt{1} + \sqrt{1})^2 - (1 + 0)^2 - (0 + 1)^2 \\ &= 4 - 1 - 1 \\ &= 2 \\ &> 0 \end{aligned}$$

因此三角不等式 $\|x + y\|_{1/2} \leq \|x\|_{1/2} + \|y\|_{1/2}$ 并不对任意 $x, y \in \mathbb{C}^2$ 成立.

这表明 $\|\cdot\|_{1/2}$ 不是 \mathbb{C}^2 上的范数.

如果不使用反 Minkowski 不等式, 则可以基于如下推理构造反例.

假设 $x, y \in \mathbb{R}_+^2$ (即它们的元素都是非负实数), 则我们有:

$$\begin{aligned} &\|x + y\|_{1/2} - \|x\|_{1/2} - \|y\|_{1/2} \\ &= \left((x_1 + y_1)^{\frac{1}{2}} + (x_2 + y_2)^{\frac{1}{2}} \right)^2 - (x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}})^2 - (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}})^2 \\ &= 2 \left(\left(\frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{2}y_1 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{1}{2}x_2 + \frac{1}{2}y_2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2 - (x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}})^2 - (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}})^2 \quad (\text{use concavity of } f(x) = \sqrt{x} \ (x \geq 0)) \\ &\geq 2 \left(\left(\frac{1}{2}x_1^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}y_1^{\frac{1}{2}} \right) + \left(\frac{1}{2}x_2^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}y_2^{\frac{1}{2}} \right) \right)^2 - (x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}})^2 - (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}})^2 \\ &= \frac{1}{2} \left((x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}}) + (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}}) \right)^2 - (x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}})^2 - (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}})^2 \\ &= -\frac{1}{2} \left((x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}}) - (y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}}) \right)^2 \end{aligned}$$

注意到最末端的式子在 $x_1^{\frac{1}{2}} + x_2^{\frac{1}{2}} = y_1^{\frac{1}{2}} + y_2^{\frac{1}{2}}$ 时等于零,

为要求凹性保证的不等式严格成立, 我们还要求 $x \neq y$.

因此我们只需取满足上面两个条件的 x, y , 便可构造反例.

Problem 5

(\mathbb{C}^n 上范数的等价性, Matrix Analysis 推论 5.4.5)

设 n 为正整数, $\|\cdot\|_\alpha, \|\cdot\|_\beta$ 为 \mathbb{C}^n 上的范数.

试证明存在正实数 C_{\min} 和 C_{\max} 使得:

$$C_{\min}\|x\|_\alpha \leq \|x\|_\beta \leq C_{\max}\|x\|_\alpha \ (\forall x \in \mathbb{C}^n).$$

- 简单起见, 在下面的证明中我们直接使用了范数的连续性,
但这里存在循环论证的风险, 因为在笔记中, 范数的连续性是通过范数的等价性证明的.
事实上, 在 Matrix Analysis 一书中, 范数等价性的证明依赖于引理 5.4.3.

Solution:

在 Euclid 单位球面 $S := \{x \in \mathbb{C}^n : \|x\|_2 = 1\}$ (它是一个紧集) 上定义 $h(x) = \|x\|_\beta / \|x\|_\alpha$.

根据范数的连续性可知 h 是紧集 S 上的连续函数.

根据 Weierstrass 定理可知 h 在 S 上存在有限的最小值 C_{\min} 和最大值 C_{\max} ,

即对于任意 $x \in S$ (即 $x \in \mathbb{C}^n$ 且 $\|x\|_2 = 1$) 我们都有 $C_{\min} \leq h(x) = \|x\|_\beta / \|x\|_\alpha \leq C_{\max}$.

根据范数的非负性和定性, 并结合 $0_n \notin S$ 可知 $C_{\min}, C_{\max} > 0$.

根据范数的齐次性可知, 对于任意非零向量 $x \in \mathbb{C}^n \setminus \{0_n\}$ 都有:

$$\begin{aligned} C_{\min} &\leq h\left(\frac{x}{\|x\|_2}\right) = \frac{\|x\|/\|x\|_2\|_\beta}{\|x\|/\|x\|_2\|_\alpha} = \frac{\|x\|_\beta / \|x\|_2}{\|x\|_\alpha / \|x\|_2} = \frac{\|x\|_\beta}{\|x\|_\alpha} \leq C_{\max} \\ &\Downarrow \\ C_{\min}\|x\|_\alpha &\leq \|x\|_\beta \leq C_{\max}\|x\|_\alpha. \end{aligned}$$

显然 $x = 0_n$ 也满足不等式 $C_{\min}\|x\|_\alpha \leq \|x\|_\beta \leq C_{\max}\|x\|_\alpha$.

因此我们有:

$$C_{\min} \|x\|_\alpha \leq \|x\|_\beta \leq C_{\max} \|x\|_\alpha \ (\forall x \in \mathbb{C}^n).$$

命题得证.

Problem 6 (optional)

设 n 为正整数.

试求下列函数的梯度:

$$f(X) = \log(\det(X)) \text{ where } \text{dom}(f) = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : \det(X) > 0\}.$$

Solution:

根据伴随矩阵的定义我们有:

$$\begin{aligned} (\text{adj}(A))^T &= [(-1)^{i+j} \det(A[\{i\}^c, \{j\}^c])]_{i,j=1}^n \\ &= \left[\frac{\partial}{\partial a_{ij}} \det(A) \right]_{i,j=1}^n, \end{aligned}$$

其中 $A[\{i\}^c, \{j\}^c]$ 代表 A 删去第 i 行和第 j 列所有元素构成的余子阵.

因此我们有:

$$\frac{\partial}{\partial A} \det(A) = \text{adj}(A).$$

容易验证:

$$[\text{adj}(A)A]_{i,j} = \begin{cases} \det(A), & \text{if } i = j \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

这表明 $\text{adj}(A)A = \det(A)I_n$.

当 A 非奇异时, 我们有 $\text{adj}(A) = \det(A)A^{-1}$ 成立.

因此对于任意满足 $\det(X) > 0$ 的 $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 我们都有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} f(X) &= \frac{\partial}{\partial X} \{\log(\det(X))\} \\ &= \frac{1}{\det(X)} \cdot \frac{\partial}{\partial X} \det(X) \\ &= \frac{1}{\det(X)} \text{adj}(X) \quad (\text{note that } \text{adj}(X) = \det(X)X^{-1}) \\ &= X^{-1} \end{aligned}$$

转置即得:

$$\nabla_X \log(\det(X)) = \left(\frac{\partial}{\partial X} f(X) \right)^T = X^{-T}.$$

Problem 7 (optional)

考虑闭区间 $[0, 1]$ 上的实值连续函数构成的空间 $C([0, 1])$.

试证明下列定义的 $C([0, 1]) \mapsto \mathbb{R}$ 的泛函 $\|\cdot\|_2$ 是范数:

$$\|f\|_2 := \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}$$

Solution:

- ① 非负性显然成立.
- ② 正定性:

$$\begin{aligned} \|f\|_2 &= \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} = 0 \\ &\Downarrow \\ f(x) &= 0 \text{ almost everywhere on } [0, 1] \end{aligned}$$

因此如果我们将 $C([0, 1])$ 空间中的几乎处处相等的函数视为同一个函数, 那么泛函 $\|\cdot\|_2$ 满足正定性.

- ③ 齐次性:

对于任意 $\alpha \in \mathbb{R}$ 都有:

$$\begin{aligned}\|\alpha f\|_2 &= \left(\int_0^1 |\alpha f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= |\alpha| \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= |\alpha| \|f\|_2.\end{aligned}$$

- ④ 次可加性(三角不等式):

(这实际上是积分形式的 Minkowski 不等式在 $p = 2$ 时的特殊情况)

任意给定 $f, g \in C([0, 1])$, 只要 $f + g$ 在 $[0, 1]$ 上不几乎处处为零, 我们就有:

$$\begin{aligned}\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx &= \int_0^1 |f(x) + g(x)| \cdot |f(x) + g(x)| dx \\ &\leq \int_0^1 |f(x) + g(x)| |f(x)| dx + \int_0^1 |f(x) + g(x)| |g(x)| dx \quad (\text{Cauchy-Schwarz inequality}) \\ &\leq \left(\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^1 |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left(\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\int_0^1 |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \right).\end{aligned}$$

左右同除 $(\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx)^{\frac{1}{2}}$ 可得:

$$\begin{aligned}\left(\int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} &\leq \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\int_0^1 |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\Updownarrow \\ \|f + g\|_2 &\leq \|f\|_2 + \|g\|_2\end{aligned}$$

事实上, 当 $f + g$ 在 $[0, 1]$ 上几乎处处为零时, 上述不等式仍然成立.

因此对于任意 $f, g \in C_{[0,1]}$ 都有 $\|f + g\|_2 \leq \|f\|_2 + \|g\|_2$ 成立.

值得注意的是, 上述证明中存在一个潜在的逻辑风险.

严格来说, 我们需要先证明由 $\langle f, g \rangle_2 := \int_0^1 f(x)g(x) dx$ 定义的泛函 $\langle \cdot, \cdot \rangle_2$ 是 $C([0, 1])$ 上的内积, 才能在上述证明中使用 Cauchy-Schwarz 不等式.

邵老师提供了关于次可加性的另一种证法:

(这个证法规避了上一种证法的分类讨论, 但没有解决潜在的逻辑风险)

$$\begin{aligned}\|f + g\|_2^2 &= \int_0^1 |f(x) + g(x)|^2 dx \\ &\leq \int_0^1 (|f(x)|^2 + 2|f(x)||g(x)| + |g(x)|^2) dx \\ &= \int_0^1 |f(x)|^2 dx + \int_0^1 |g(x)|^2 dx + 2 \int_0^1 |f(x)||g(x)| dx \quad (\text{Cauchy-Schwarz inequality}) \\ &\leq \int_0^1 |f(x)|^2 dx + \int_0^1 |g(x)|^2 dx + 2 \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^1 |g(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \|f\|_2^2 + \|g\|_2^2 + 2\|f\|_2\|g\|_2 \\ &= (\|f\|_2 + \|g\|_2)^2\end{aligned}$$

因此对于任意 $f, g \in C_{[0,1]}$ 都有 $\|f + g\|_2 \leq \|f\|_2 + \|g\|_2$ 成立.

综上所述, 泛函 $\|\cdot\|_2$ 是 $C_{[0,1]}$ 空间上的范数.

Problem 8

设 m, n 为正整数, $A \in \mathbb{C}^{m \times m}, B \in \mathbb{C}^{n \times n}$.

试用 $\det(A)$ 和 $\det(B)$ 表示 $\det(A \otimes B)$.

- Kronecker 乘积的性质:

$(A \otimes B)(C \otimes D) = (AC) \otimes (BD)$ if the matrix products AB and CD are well-defined

$$\begin{cases} (A \otimes B)^T = A^T \otimes B^T \\ (A \otimes B)^{-1} = A^{-1} \otimes B^{-1} \\ (A \otimes B)^\dagger = A^\dagger \otimes B^\dagger \end{cases}$$

Solution:

设 A 的 Jordan 分解为 $A = P_1 J_1 P_1^{-1}$, B 的 Jordan 分解为 $B = P_2 J_2 P_2^{-1}$.

设 A 的特征值是 $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{C}$ (于是 J_1 的对角元为 $\lambda_1, \dots, \lambda_m$).

设 B 的特征值是 $\mu_1, \dots, \mu_n \in \mathbb{C}$ (于是 J_2 的对角元为 μ_1, \dots, μ_n).

则我们有:

$$\begin{aligned} \det(A \otimes B) &= \det((P_1 J_1 P_1^{-1}) \otimes (P_2 J_2 P_2^{-1})) \\ &= \det((P_1 \otimes P_2)(J_1 \otimes J_2)(P_1^{-1} \otimes P_2^{-1})) \\ &= \det((P_1 \otimes P_2)(J_1 \otimes J_2)(P_1 \otimes P_2)^{-1}) \\ &= \det((J_1 \otimes J_2)(P_1 \otimes P_2)^{-1}(P_1 \otimes P_2)) \\ &= \det(J_1 \otimes J_2) \\ &= \prod_{i=1}^m \left\{ \lambda_i^n \prod_{j=1}^n \mu_j \right\} \\ &= \prod_{i=1}^m \lambda_i^n \cdot \left(\prod_{j=1}^n \mu_j \right)^m \\ &= (\det(A))^n \cdot (\det(B))^m. \end{aligned}$$

Problem 9

构造非奇异矩阵 P 使得

$$P^{-1}AP = P^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 6 \\ & 1 & 7 & 8 \\ & & 2 & 3 \\ & & & 4 \end{bmatrix} P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ & 1 & & \\ & & 2 & \\ & & & 4 \end{bmatrix} = J.$$

- **Observation:** 等式右侧的矩阵 J 是原矩阵 A 的 Jordan 标准型.

Solution:

注意到相似变换前后的矩阵都是上三角阵,

因此对称行列消元是不可取的, 因为这样会破坏上三角的性状.

一个朴素的想法是将 P 取为上三角阵 (特别地, 单位上三角阵):

$$P = \begin{bmatrix} 1 & a & b & c \\ & 1 & d & e \\ & & 1 & f \\ & & & 1 \end{bmatrix}.$$

根据等式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 6 \\ & 1 & 7 & 8 \\ & & 2 & 3 \\ & & & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a & b & c \\ & 1 & d & e \\ & & 1 & f \\ & & & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & b & c \\ & 1 & d & e \\ & & 1 & f \\ & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ & 1 & & \\ & & 2 & \\ & & & 4 \end{bmatrix},$$

把两边相乘并逐项比较上三角元素, 得到以下方程组:

$$\begin{aligned} (1, 2) : a + 1 &= 1 + a \\ (1, 3) : b + d + 5 &= 2b \\ (1, 4) : c + e + 5f + 6 &= 4c \\ (2, 3) : d + 7 &= 2d \\ (2, 4) : e + 7f + 8 &= 4e \\ (3, 4) : 2f + 3 &= 4f. \end{aligned}$$

解得:

$$a \in \mathbb{R}, \quad b = 12, \quad c = \frac{59}{9},$$

$$d = 7, \quad e = \frac{37}{6}, \quad f = \frac{3}{2}.$$

因此 P 可以取为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & a & 12 & \frac{59}{9} \\ & 1 & 7 & \frac{37}{6} \\ & & 1 & \frac{3}{2} \\ & & & 1 \end{bmatrix},$$

其中 $a \in \mathbb{R}$ 可以是任意实数.

(为方便手工求逆, 我们可以取 $a = 0$)

Problem 10

设 n 是大于 1 的整数, $p \in (0, 1)$, 定义 \mathbb{C}^n 上的函数 $\|\cdot\|_p$ 如下:

$$\|x\|_p := \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \quad (\forall x \in \mathbb{C}^n).$$

证明: $\|\cdot\|_p$ 不是 \mathbb{C}^n 上的范数.

- **Note:** 此命题是本次作业 Problem 04 的推广.

Solution:

任意给定 $n \geq 2$ 和 $p \in (0, 1)$.

在反 Minkowski 不等式的指导下, 我们构造如下反例:

$$x = e_1, \quad y = e_2, \quad x + y = e_1 + e_2,$$

其中 e_i 代表 \mathbb{C}^n 的第 i 个单位基向量 (即第 i 个元素为 1, 其余元素为 0 的 n 维向量).

我们有:

$$\begin{aligned} \|x + y\|_p &= (1^p + 1^p)^{\frac{1}{p}} \\ &= 2^{\frac{1}{p}} \quad (\text{note that } \frac{1}{p} > 1) \\ &> 2 \\ &= (1^p)^{\frac{1}{p}} + (1^p)^{\frac{1}{p}} \\ &= \|x\|_p + \|y\|_p. \end{aligned}$$

这说明当 $p \in (0, 1)$ 时, 函数 $\|\cdot\|_p$ 不满足次可加性, 因而不是一个范数.

Problem 11 (optional)

设 m, n 为正整数, $A \in \mathbb{C}^{m \times m}, B \in \mathbb{C}^{n \times n}$.

证明: 若 A 和 B 有公共特征值, 则存在 $X \in \mathbb{C}^{m \times n} \setminus \{0_{m \times n}\}$ 使得 $AX = XB$.

- **(Sylvester 定理, Matrix Analysis 定理 2.4.4.1)**

设 $A \in \mathbb{C}^{m \times m}, B \in \mathbb{C}^{n \times n}, C \in \mathbb{C}^{m \times n}$.

当且仅当 A, B 没有公共特征值 (即 $\text{eig}(A) \cap \text{eig}(B) = \emptyset$) 时,

Sylvester 方程 $AX - XB = C$ 有唯一解 $X \in \mathbb{C}^{m \times n}$.

特别地, 若 C 是全零矩阵, 则此唯一解就是 $X = 0_{m \times n}$.

证明过程参见 "FDU 高等线性代数 1. 复数与复方阵", 搜索关键词 "Sylvester 定理".

Solution:

这个命题是 Sylvester 定理 ($C = 0_{m \times n}$ 的特殊情况) 的反面, 证明从略.

Problem 12 (optional)

设 $p \in [1, +\infty)$.

对于闭区间 $[0, 1]$ 上的实值连续函数 $f \in C([0, 1])$ 定义泛函

$$\|f\|_p := \left(\int_0^1 |f(x)|^p dx \right)^{1/p}, \quad \|f\|_\infty := \max_{0 \leq x \leq 1} |f(x)|.$$

证明:

- ① 泛函 $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_2, \|\cdot\|_\infty$ 是 $C([0, 1])$ 上的范数.
- ② 对于任意 $f \in C([0, 1])$ 都有 $\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p = \|f\|_\infty$ 成立.

(1) Part 1

证明泛函 $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_2, \|\cdot\|_\infty$ 是 $C([0, 1])$ 上的范数.

Solution:

本次作业的 **Problem 07** 已经证明了泛函 $\|\cdot\|_2$ 是 $C([0, 1])$ 上的范数,

其中最难证明的是次可加性 (即三角不等式).

事实上, 这一性质可以借助积分形式的 Minkowski 不等式来直接推导,
但引入积分形式的 Minkowski 不等式是有代价的, 需要一些泛函分析的知识,
因此我们还是采用直接证明的方法.

下面证明泛函 $\|\cdot\|_1$ 是 $C([0, 1])$ 上的范数.

- ① 非负性显然成立.
- ② 正定性:

$$\|f\|_1 = \int_0^1 |f(x)| dx = 0$$

\Updownarrow

$$f(x) = 0 \text{ almost everywhere on } [0, 1]$$

因此如果我们将 $C([0, 1])$ 空间中的几乎处处相等的函数视为同一个函数, 那么泛函 $\|\cdot\|_1$ 满足正定性.

- ③ 齐次性:

对于任意 $\alpha \in \mathbb{R}$ 都有:

$$\begin{aligned} \|\alpha f\|_1 &= \int_0^1 |\alpha f(x)| dx \\ &= |\alpha| \int_0^1 |f(x)| dx \\ &= |\alpha| \|f\|_1. \end{aligned}$$

- ④ 次可加性 (三角不等式):

(这实际上是积分形式的 Minkowski 不等式在 $p = 1$ 时的特殊情况)

任意给定 $f, g \in C([0, 1])$, 我们都有:

$$\begin{aligned} \|f + g\|_1 &= \int_0^1 |f(x) + g(x)| dx \\ &\leq \int_0^1 |f(x)| dx + \int_0^1 |g(x)| dx \\ &\leq \|f\|_1 + \|g\|_1. \end{aligned}$$

下面证明泛函 $\|\cdot\|_\infty$ 是 $C([0, 1])$ 上的范数.

- ① 非负性显然成立.
- ② 正定性:

$$\|f\|_\infty = \max_{0 \leq x \leq 1} |f(x)| = 0$$

\Updownarrow

$$f(x) = 0 \text{ almost everywhere on } [0, 1]$$

因此如果我们将 $C([0, 1])$ 空间中的几乎处处相等的函数视为同一个函数, 那么泛函 $\|\cdot\|_\infty$ 满足正定性.

- ③ 齐次性:

对于任意 $\alpha \in \mathbb{R}$ 都有:

$$\begin{aligned}\|\alpha f\|_\infty &= \max_{0 \leq x \leq 1} |\alpha f(x)| \\ &= |\alpha| \max_{0 \leq x \leq 1} |f(x)| \\ &= |\alpha| \|f\|_\infty.\end{aligned}$$

- ④ 次可加性(三角不等式):
任意给定 $f, g \in C([0, 1])$, 我们都有:

$$\begin{aligned}\|f + g\|_\infty &= \max_{0 \leq x \leq 1} |f(x) + g(x)| \\ &\leq \max_{0 \leq x \leq 1} |f(x)| + \max_{0 \leq x \leq 1} |g(x)| \\ &\leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty.\end{aligned}$$

(2) Part 2

证明对于任意 $f \in C([0, 1])$ 都有 $\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p = \|f\|_\infty$ 成立.

Solution:

任意给定 $f \in C([0, 1])$.

一方面, 对于任意 $p \geq 1$, 我们都有:

$$\begin{aligned}\|f\|_p^p &= \int_0^1 |f(x)|^p dx \\ &\leq \int_0^1 \left(\max_{0 \leq x \leq 1} |f(x)| \right)^p dx \\ &= \int_0^1 \|f\|_\infty^p dx \\ &= \|f\|_\infty^p.\end{aligned}$$

因此我们有:

$$\limsup_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \|f\|_\infty.$$

另一方面, 对于任意 $p \geq 1$ 和 $\varepsilon \in (0, \|f\|_\infty)$, 我们都有:

$$\begin{aligned}\|f\|_p^p &= \int_0^1 |f(x)|^p dx \\ &\geq \int_{\{x: |f(x)| \geq \|f\|_\infty - \varepsilon\}} |f(x)|^p dx \\ &\geq \int_{E_\varepsilon} (\|f\|_\infty - \varepsilon)^p dx \quad (\text{denote } E_\varepsilon := \{x : |f(x)| \geq \|f\|_\infty - \varepsilon\}) \\ &= (\|f\|_\infty - \varepsilon)^p m(E_\varepsilon),\end{aligned}$$

其中 $m(E_\varepsilon) > 0$ 代表集合 E_ε 的 Lebesgue 测度.

于是我们有:

$$\|f\|_p \geq (\|f\|_\infty - \varepsilon)(m(E_\varepsilon))^{\frac{1}{p}} \rightarrow (\|f\|_\infty - \varepsilon) \quad (p \rightarrow \infty).$$

因此我们有:

$$\liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \geq (\|f\|_\infty - \varepsilon),$$

令 $\varepsilon \rightarrow 0$ 即得:

$$\liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \geq \|f\|_\infty.$$

综上所述, 我们有:

$$\|f\|_\infty \leq \liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \limsup_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \|f\|_\infty.$$

于是极限 $\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p$ 存在, 且 $\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p = \|f\|_\infty$.

Problem 13 (optional)

构造次数最低的首一有理系数多项式 $p(\cdot)$, 使得 $p(\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}) = 0$.

- **Observation:**

注意到 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 是 $\{1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6}\}$ 的有理系数组合,

换言之, $(\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}) \in \mathbb{Q}[\sqrt{2}, \sqrt{3}] = \{q_1 + q_2\sqrt{2} + q_3\sqrt{3} + q_4\sqrt{6} : q_1, q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{Q}\}$.

可以证明 $\mathbb{Q}[\sqrt{2}, \sqrt{3}]$ 是包含 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 的最小数域, 参见 Homework 04 Problem 04,

因此能够零化 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 的首一有理系数多项式的次数至少为 4.

事实上, $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 的次数最低的首一有理系数零化多项式为:

$$\begin{aligned} p(x) &= x^4 - 22x^2 - 48x - 23 \\ &= (x - (\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}))(x - (\sqrt{2} - \sqrt{3} - \sqrt{6}))(x - (-\sqrt{2} + \sqrt{3} - \sqrt{6}))(x - (-\sqrt{2} - \sqrt{3} + \sqrt{6})). \end{aligned}$$

其四个根对应对 $\sqrt{2}$ 和 $\sqrt{3}$ 做独立的 Galois 共轭置换, $\sqrt{6}$ 的符号随之确定.

(1) Solution 1

记 $x = \sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$, $\alpha = \sqrt{6}$, 则我们有:

$$\begin{aligned} x - \alpha &= \sqrt{2} + \sqrt{3} \\ &\Downarrow \\ (x - \alpha)^2 &= (\sqrt{2} + \sqrt{3})^2 \end{aligned}$$

展开左右两式:

$$\begin{aligned} \text{LHS} &= (x - \alpha)^2 \\ &= x^2 - 2\alpha x + \alpha^2 \\ &= x^2 - 2\alpha x + 6 \\ \text{RHS} &= (\sqrt{2} + \sqrt{3})^2 \\ &= 5 + 2\sqrt{6} \\ &= 5 + 2\alpha \end{aligned}$$

因此我们有:

$$x^2 - 2\alpha x + 6 = 5 + 2\alpha,$$

解得:

$$\alpha = \frac{x^2 + 1}{2(x + 1)}.$$

代入 $\alpha^2 = 6$ 可得:

$$\left(\frac{x^2 + 1}{2(x + 1)} \right)^2 = 6.$$

展开并化简可得:

$$x^4 - 22x^2 - 48x - 23 = 0.$$

由于其次数为 4, 最高次项的系数为 1,

故 $p(x) = x^4 - 22x^2 - 48x - 23$ 是 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 的次数最低的首一有理系数零化多项式.

(2) Solution 2

- **Lemma 1:**

考虑关于 $x \in \mathbb{F}$ 的 n 次首一复系数多项式 $p(x) = x^n + \alpha_{n-1}x^{n-1} + \alpha_{n-2}x^{n-2} + \cdots + \alpha_1x + \alpha_0$.

方程 $p(x) = 0$ 可等价表示为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & & & & \\ & 0 & 1 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & 0 & 1 & \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & \cdots & -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ \vdots \\ x^{n-2} \\ x^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ \vdots \\ x^{n-2} \\ x^{n-1} \end{bmatrix} x.$$

记上述线性方程组的系数矩阵为 A ,

则 $p(x)$ 的根 λ 一定是 A 的特征值, 对应的特征向量为 $[1, \lambda, \dots, \lambda^{n-2}, \lambda^{n-1}]^T$.

我们称 A 为 $p(x)$ 的 **Frobenius 友阵** (Frobenius companion matrix).

可以证明 $p(x)$ 既是其 Frobenius 友阵 A 的特征多项式, 又是 A 的极小多项式.

- **Lemma 2:**

设 (λ, x) 是 $A \in \mathbb{C}^{m \times m}$ 的特征对, (μ, y) 是 $B \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 的特征对.

我们有:

$$\begin{aligned} (A \otimes B)(x \otimes y) &= (Ax) \otimes (By) \\ &= (x\lambda) \otimes (y\mu) \\ &= (x \otimes y)(\lambda\mu) \\ \overline{(A \otimes I_n + I_m \otimes B)(x \otimes y)} &= (Ax) \otimes (I_n y) + (I_m x) \otimes (By) \\ &= (x\lambda) \otimes y + x \otimes (y\mu) \\ &= (x \otimes y)(\lambda + \mu). \end{aligned}$$

这说明 $(\lambda\mu, x \otimes y)$ 是 $A \otimes B$ 的特征对, $(\lambda + \mu, x \otimes y)$ 是 $(A \otimes I_n + I_m \otimes B)$ 的特征对.

因此 $(\lambda + \mu + \lambda\mu, x \otimes y)$ 是 $(A \otimes I_n + I_m \otimes B + A \otimes B)$ 的特征对.

Solution:

显然 $\sqrt{2}$ 和 $\sqrt{3}$ 的次数最低的首一零化多项式为:

$$\begin{aligned} p_1(x) &= x^2 - 2 \\ p_2(x) &= x^2 - 3. \end{aligned}$$

根据 Lemma 1 我们可以构造 $p_1(x), p_2(x)$ 的 Frobenius 友阵如下:

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

根据 Lemma 2 可知 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 是如下矩阵的特征值:

$$\begin{aligned} &A \otimes I_2 + I_2 \otimes B + A \otimes B \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 3 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 1 \\ 6 & 2 & 3 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

容易验证, 上述矩阵的特征多项式为 $p(x) = x^4 - 22x^2 - 48x - 23$.

由于其次数为 4, 最高次项的系数为 1,

故 $p(x)$ 是 $\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$ 的次数最低的首一有理系数零化多项式.

The End