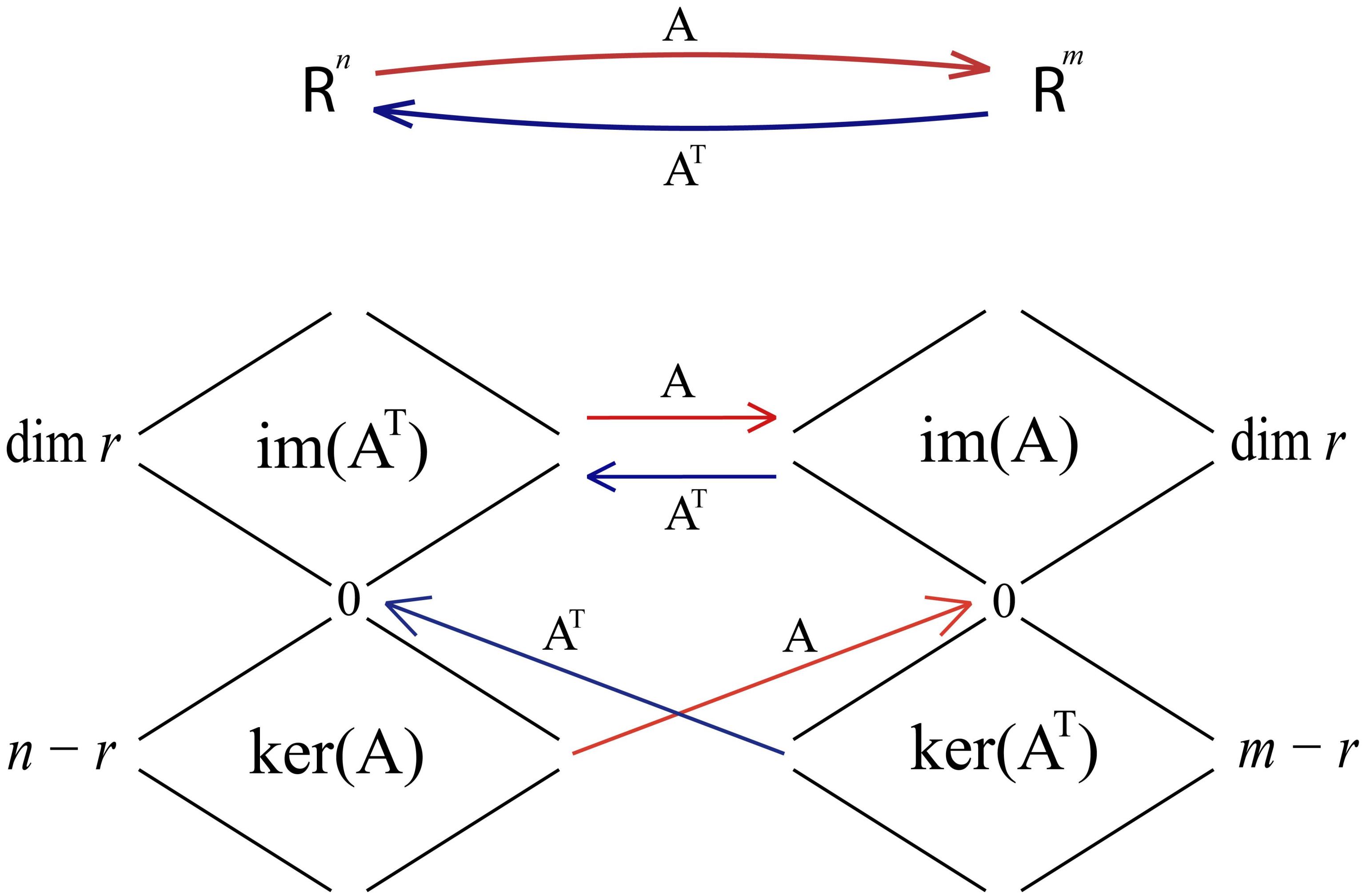

线性代数 A 习题课讲义集

作者：Caiyou Yuan

时间：October 5, 2021

特别声明

这里主要整理了作者在担任北京大学线性代数 A 这门课程的助教期间，在习题课上讲解的一些题目，主要参考了，

1. 高等代数（第三版）丘维声，高等教育出版社
2. 高等代数学习指导书（第二版）丘维生，清华大学出版社

以及一些其他书籍。

作者能力有限，难免有考虑不周和疏漏之处，欢迎批评指正。

Caiyou Yuan

October 5, 2021

目录

第 1 章 线性方程组

- 矩阵的初等行变换
- 阶梯形矩阵，简化阶梯形矩阵
- Guass-Jordan 算法, 无解/有唯一解/有无数解
- 数域, Q, R, C

例题

1. 证明任意一个矩阵都可以经过一系列初等行变换化为 (简化) 阶梯形矩阵.

2. 解如下线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + \cdots + x_n = 1 \\ x_2 + x_3 + \cdots + x_{n+1} = 2 \\ x_3 + x_4 + \cdots + x_{n+2} = 3 \\ \vdots \\ x_{n+1} + x_{n+2} + \cdots + x_{2n} = n+1 \end{cases}$$

3. 解如下线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + \cdots + (n-1)x_{n-1} + nx_n = b_1 \\ nx_1 + x_2 + \cdots + (n-2)x_{n-1} + (n-1)x_n = b_2 \\ (n-1)x_1 + nx_2 + \cdots + (n-3)x_{n-1} + (n-2)x_n = b_3 \\ \vdots \\ 2x_1 + 3x_2 + \cdots + nx_{n-1} + x_n = b_n \end{cases}$$

   其中 $b_1, \cdots b_n$ 为给定常数

第 2 章 行列式

2.1 n 元排列

- 逆序数
- 奇/偶排列

例题

1. 设 $1,2,\cdots,n$ 的 n 元排列 $a_1a_2\cdots a_kb_1b_2\cdots b_{n-k}$ 有
$$\tau(a_1a_2\cdots a_k)=\tau(b_1b_2\cdots b_{n-k})=0$$
那么 $\tau(a_1a_2\cdots a_kb_1b_2\cdots b_{n-k})$ 是多少? $n,k,a_1,\cdots,a_k,b_1,\cdots,b_{n-k}$ 均已知, $\tau(a_1a_2\cdots a_k)$ 表示排列 $a_1a_2\cdots a_k$ 的逆序数.

2. 说明 n(n>1) 元排列中，奇偶排列各占一半

3. (1) 若 $\tau(a_1a_2\cdots a_n)=r$, 那么 $\tau(a_na_{n-1}\cdots a_1)$ 是多少?

   (2) 计算所有 n 元排列的逆序数之和

2.2 n 阶行列式的定义

$$\begin{aligned}\det A&=\sum_{j_1j_2\cdots j_n}(-1)^{\tau(j_1j_2\cdots j_n)}a_{1j_1}a_{2j_2}\cdots a_{nj_n}\\&=\sum_{i_1i_2\cdots i_n}(-1)^{\tau(i_1i_2\cdots i_n)}a_{i_11}a_{i_22}\cdots a_{i_nn}\end{aligned}$$

注 如何从上一行定义，导出下一行定义？见课本[1]24-25 页

例题

1. 下列行列式是 x 的几次多项式, 求出 x^4 项和 x^3 项的系数

$$\begin{vmatrix} 5x & x & 1 & x \\ 1 & x & 1 & -x \\ 3 & 2 & x & 1 \\ 3 & 1 & 1 & x \end{vmatrix}$$

2. 计算下列行列式

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ b_2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_3 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_n & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix}$$

2.3 行列式的性质

例题

- 计算下列行列式

$$\begin{vmatrix} x_1 - a_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_1 & x_2 - a_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_1 & x_2 & x_3 - a_3 & \cdots & x_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n - a_n \end{vmatrix}$$

  其中 $a_i \neq 0, i = 1, \cdots, n$.

2.4 行列式按一行 (列) 展开

- 余子式, 代数余子式
- Vandermonde 行列式 (行列式的递推)

注 按行展开如何从行列式定义推导?

例题

1. 计算下列行列式

(1)

$$\begin{vmatrix} 2a & a^2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2a & a^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2a & a^2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 2a & a^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 2a \end{vmatrix}$$

(2)

$$\begin{vmatrix} a+b & ab & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a+b & ab & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a+b & ab & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & a+b & ab \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & a+b \end{vmatrix}$$

(3)

$$\begin{vmatrix} a & b & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ c & a & b & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & a & b & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & c & a & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & c & a \end{vmatrix}$$

2. 计算如下行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{n-1}^2 & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{n-2} & x_2^{n-2} & \cdots & x_{n-1}^{n-2} & x_n^{n-2} \\ x_1^n & x_2^n & \cdots & x_{n-1}^n & x_n^n \end{vmatrix}$$

2.5 Cramer 法则

例题

1. 对于线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} b_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots \quad B_n = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & b_n \end{bmatrix}$$

证明:

a. 当 $\det A \neq 0$ 时，方程组有唯一解；

b. 当 $\det A \neq 0$ 时，方程组的唯一解为

$$x_i = \frac{\det B_i}{\det A}, \quad i = 1, 2, \cdots, n.$$

2.6 行列式按多行展开

例题

1. 证明

$$(\det A)(\det B) = \det C$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad c_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik}b_{kj}$$

提示，考虑如下 $2n$ 阶矩阵

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & \cdots & 0 & b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ 0 & -1 & \cdots & 0 & b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

第 3 章 n 维向量空间

3.1 K^n 及其子空间

- K^n 的定义 (有限维线性空间的典例)
- 子空间
- 线性表出（求解线性方程组的另一个角度)

3.2 线性相关/无关

- 原向量组线性相关/无关，部分组如何?
- 部分组线性相关/无关，该向量组如何?
- 原向量组线性相关/无关，延伸组/缩短组如何?

例题

1. 设数域 K 上 $m \times n$ 矩阵 H 的列向量组为 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$. 证明：$H$ 的任意 s 列 ($s \leq \min\{m, n\}$) 都线性无关当且仅当，$Hx = 0$ 的任意非零解的非零分量大于 s

3.3 极大线性无关组，向量组的秩

- 向量组的等价
- 极大线性无关组: 向量组及其极大线性无关组等价
- 向量组的秩: 向量组的极大线性无关组的向量数目相同
- 如果向量组 I 可以由向量组 II 线性表出，则二者的秩有大小关系

例题

1. 设数域 K 上 $s \times n$ 矩阵 ($s \leq n$)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{s1} & a_{s2} & \cdots & a_{sn} \end{bmatrix}$$

满足

$$2|a_{ii}| > \sum_{j=1}^{n} |a_{ij}|, \quad i = 1, \ldots, s$$

证明：A 的行向量的组的秩等于 s.

2. 证明两个向量组等价的充要条件是：秩相等且其中一个向量组可以被另一个线性表出。

3. 设向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_s$ 的秩为 r, 在其中任取 m 个向量 $\alpha_{i_1}, \alpha_{i_2}, \cdots, \alpha_{i_m}$, 证明此向量组的秩 $\geq r+m-s$.

4. 设向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_s; \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_t; \alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_s, \beta_1, \cdots, \beta_t$ 的秩分别为 r_1, r_2, r_3. 证明
$$\max(r_1, r_2) \leq r_3 \leq r_1 + r_2$$

3.4 基, 维数

- 基
- 维数

3.5 矩阵的秩

- 行秩等于列秩，即为矩阵的秩；如何说明？
- 任意非零矩阵的秩等于其非零子式的最高阶数; 如何说明？

例题

1. 证明:
$$\operatorname{rank}\begin{pmatrix} A & C \\ 0 & B \end{pmatrix} \geq \operatorname{rank}(A) + \operatorname{rank}(B).$$

2. 证明：如果 $m \times n$ 矩阵 A 的秩为 r, 则它的任意 s 行组成的子矩阵，秩不小于 $r+s-m$.

3.6 线性方程组有解的充要条件

- 系数矩阵和增广矩阵有相同的秩

3.7 齐次/非齐次线性方程组的解

- 齐次/非齐次线性方程组的解集是一个子空间/陪集

例题

1. 用行列式给出三点 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3,$ 不在一条直线上的充要条件

2. 给出通过不在一条直线上三点 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3,$ 的圆的方程

3. 证明: 通过有理数坐标的三点的圆，其圆心坐标也是有理数

4. 求三个平面
$$a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0, \quad i = 1, 2, 3$$
通过一条直线但是不合并为一个平面的充分必要条件.

第 4 章 矩阵

4.1 矩阵的运算和特殊矩阵

- 相同行列数目的矩阵全体在加法和数乘下构成线性空间
- 矩阵的乘法 (线性映射的复合, 有限维线性映射的典型)

例题

1. (矩阵的幂次)

   (a)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

   计算 A^m, 其中 m 为正整数.

   (b)

$$J = \begin{bmatrix} x & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x \end{bmatrix}_{n \times n}$$

   计算 J^m, 其中 m 为正整数.

2. 证明: 反对称矩阵的秩为偶数

4.2 矩阵相乘的秩与行列式

- $\operatorname{rank}(AB) \leq \min\{\operatorname{rank}(A), \operatorname{rank}(B)\}$
- 实数域上，$\operatorname{rank}(A^T A) = \operatorname{rank}(A)$
- Binet-Cauchy 公式

例题

1. 举例说明，对于复矩阵 A, 有可能 $\mathrm{rank}(A^T A) \neq \mathrm{rank}(A)$

2. 证明，对于实数域上的任意 $s \times n$ 矩阵 A, 都有 $\mathrm{rank}(AA^T A) = \mathrm{rank}(A)$

3. 设 A, B 分别是数域 K 上的 $s \times n, n \times m$ 矩阵，证明：如果 $\mathrm{rank}(AB) = \mathrm{rank}(B)$, 那么对于任意的数域 K 上的 $m \times r$ 的矩阵 C, 都有
$$\mathrm{rank}(ABC) = \mathrm{rank}(BC).$$

4. 计算如下矩阵的行列式
$$A = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 - \beta_1) & \cos(\alpha_1 - \beta_2) & \cdots & \cos(\alpha_1 - \beta_n) \\ \cos(\alpha_2 - \beta_1) & \cos(\alpha_2 - \beta_2) & \cdots & \cos(\alpha_2 - \beta_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \cos(\alpha_n - \beta_1) & \cos(\alpha_n - \beta_2) & \cdots & \cos(\alpha_n - \beta_n) \end{bmatrix}$$

4.3 线性映射

- $\dim(\ker A) + \dim(\mathrm{Im} A) = \dim(K^n)$

例题

1. 设 S 是一个有限集合, 映射 $f : S \to S$, 证明: f 为单射和 f 为满射互相等价.

2. 上一题结论在 S 不是有限集合的时候成立么？若成立，请证明；不成立给出反例

3. 设 V 是一个有限维线性空间, 线性映射 $L : V \to V$, 证明: L 为单射和 L 为满射互相等价.

参考文献

[1] 丘维生. 高等代数（第三版）上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.