数据科学与工程数学基础

作业提交规范及第 3 次作业

教师：黄定江
助教：陈诺、刘文辉

2022 年 11 月 2 日

作业提交规范

1. 作业提交形式：**使用 Word 或 LaTeX 编写所得到的电子文档**。若使用 Word 编写，将其另存为 PDF 形式，然后提交 PDF 文档。若使用 LaTeX 编写，将其编译成 PDF 形式，然后提交 Tex 和 PDF 两个文档。
2. 作业命名规范：提交的电子文档必须命名为："**学号 _ 姓名**"。命名示例：52200000000_ 刘某某。
3. 作业提交途径：点击打开每次作业的传送门网址：**第 3 次作业提交传送门**，无需注册和登录，直接上传作业文档即可。注意：传送门将会在截至时间点到达后自动关闭。
4. 作业更改说明：如果需要修改已经提交的作业，只要在截至日期前，再次上传更改后的作业（切记保持同名），即可覆盖已有作业。
5. 作业评分说明：正常提交作业的按照实际评分记录；逾期补交作业的根据逾期情况在实际评分基础上酌情扣分；未交作业的当次作业记为 0 分。

第 3 次作业

提交截至时间：**2022/10/21 周五 12:00（中午）**

理论部分 (范数与二次型)

习题 1. 证明：（**关联矩阵的四个子空间性质**）设图 $G=<\mathbb{V},\mathbb{E}>$ 是一个具有 m 个顶点和 n 条边的连通图，其对应的关联矩阵为 $\boldsymbol{B}$，则关于 $\boldsymbol{B}$ 的四个基本子空间具有以下性质：

- $\boldsymbol{B}$ 的左零空间维数为 1，即 $Null\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=1$，且 $Null\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=\mathbf{span}\{\mathbf{1}\}$。
- $\boldsymbol{B}$ 的行空间维数为 $m-1$，即 $Col\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=m-1$，且 $Col\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)$ 可由 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 任意 $m-1$ 个列向量生成。
- $\boldsymbol{B}$ 的列空间维数为 $m-1$，即 $Col\left(\boldsymbol{B}\right)=m-1$，且若 T 是图 G 的一棵生成树，那么 $Col\left(\boldsymbol{B}\right)$ 可由 T 的关联矩阵的 $m-1$ 个列向量生成。
- $\boldsymbol{B}$ 的零空间维数为 $n-m+1$，即 $Null\left(\boldsymbol{B}\right)=n-m+1$，这个数等于图 G 中小圈的个数。

解. 因为 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 的行恰好对应有向图的边，因此，这些行线性相关等价于这些边是否存在环。又因为一个顶点为 m 的连通图，不形成环当且仅当其边数为 $m-1$。因此，$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 的秩为 $m-1$。

- 易知 $Null\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=m-(m-1)=1$。易知，每一行仅有一个元素恰为 *1*，一个元素恰为 *-1*. 因此，$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{1}=\mathbf{0}$。所以 $Null\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=\mathbf{span}\{\mathbf{1}\}$。
- 易知 $Col\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)=m-1$ 成立。下面利用反证法说明 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 任意 $m-1$ 个列向量线性无关。假设 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$ 的 m 个列向量分别为 $b_1,\cdots,b_m$。不妨设前 $m-1$ 个列向量线性相关，且 $b_1=k_2b_2+\cdots+k_{m-1}b_{m-1}$。从而，$(-1,k_2,\cdots,k_{m-1},0)^{\top}\in Null\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\right)$。这与第一问的结论矛盾，故得证。（或者不利用第一问的结论去证：又因为根据上述左零空间的性质知 $b_m=-b_1-\cdots-b_{m-1}$。所以 $b_m=-(k_2+1)b_2-\cdots-(k_{m-1}+1)b_{m-1}$。因此，秩小于等于 $m-2$，矛盾。故得证。）
- 易知 $Col\left(\boldsymbol{B}\right)=m-1$ 成立。若 T 是图 G 的一棵生成树，则加入 G 中的其他的任一条边，必然会形成一个环。因此，$\boldsymbol{B}$ 中除 T 的关联矩阵的 $m-1$ 列向量以外的其他列向量，可由这 $m-1$ 个列向量生成。
- 易知 $Null\left(\boldsymbol{B}\right)=n-(m-1)=n-m+1$。小圈的数目恰好是图变成一棵生成树所需删除边的数目，即 $n-(m-1)$。因此，相等。

习题 2. 求向量 $(1,1,1)^T$ 投影到一维子空间 $span\{(1,-1,1)^T\}$ 的正交投影。

解. 首先求得投影矩阵

$$P_\pi=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&-1&1\\-1&1&-1\\1&-1&1\end{pmatrix}$$

向量 $(1,1,1)^T$ 投影到一维子空间 $span\{(1,-1,1)^T\}$ 的正交投影为

$$P_\pi\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1&-1&1\\-1&1&-1\\1&-1&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}=\frac{1}{3}\begin{pmatrix}1\\-1\\1\end{pmatrix}$$

习题 3. 完成以下阅读材料即可。

- **为什么需要 *LU* 分解？**

为什么不直接求解方程组 $Ax = b$？如果了解 LU 分解所需要的计算量与高斯消去法解方程组所需的计算量，便可知计算复杂度均为 $O(n^3)$。似乎 LU 分解并没有任何优势。然而，在实际的工程问题中，我们经常会遇到的是这样的问题，需要求解这样一系列的方程组（例如时序的）：

$$Ax = b_1,\ Ax = b_2,\ \cdots,\ Ax = b_r.$$

其中的系数矩阵是不变的，只是右边的常数项在改变。这时，如果直接使用高斯消去法求解各个方程组的话，则对应的计算复杂度为 $O(rn^3)$。若使用 LU 分解，则只需要的运算量级为 $O(n^3 + rn^2)$，这是因为 LU 分解在解方程组时只需要 $O(n^2)$。

或许，你会提出直接计算出 A^{-1}，然后再利用它去求解各个方程组。这时所需要的计算量的效果似乎与 LU 分解是相似的。事实上，在实际计算中往往不会直接计算矩阵的逆。这里给出其中一个原因：通常实际工程中矩阵 A 的维度很大，但有一个优点是它是稀疏的，例如一个“带状的”矩阵。使用 LU 分解，可以保持矩阵的稀疏性（因此，还可以提高运算速度）。然而，直接求解矩阵的逆，则会丢失矩阵的稀疏性。因此，在数据的存储上直接求逆存在明显的劣势。

- ***Gauss* 消去与 *LU* 分解**

还记得初中学过的求解二元一次方程组的消元法吗？这就是 LU 分解与 *Cholesky* 分解的全部。假设我们有如下二元一次方程组

$$\begin{cases} 2x_1 + 4x_2 = 5 \\ 4x_1 + 5x_2 = 3 \end{cases}$$

现在我们考虑方程组的求解。在中学时，我们会通过将第一个等式乘以 -2 加到第二个等式，则得到

$$\begin{cases} 2x_1 + 4x_2 = 5 \\ 0x_1 - 3x_2 = -7 \end{cases}$$

这个行变换对应的矩阵为 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \end{pmatrix}$，它的逆矩阵就是 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$。另外，变换后的系数矩阵为 $\begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 0 & -3 \end{pmatrix}$。

如果我们使用 LU 分解，则可得到

$$\begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 0 & -3 \end{pmatrix}$$

从上可以看出，高斯消去的变换矩阵的逆恰好对应 LU 分解的 L 矩阵，变换后的系数矩阵恰好对应 U 矩阵。

习题 4. 对矩阵 $\begin{pmatrix} 5 & 3 & -1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & -2 \\ -5 & -3 & 4 & -4 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 进行 LU 分解。

解. （具体计算过程可参考教材或课件中的例题。）

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 5 & 3 & -1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & -2 \\ -5 & -3 & 4 & -4 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 & 3 & -1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = \boldsymbol{LU}$$

习题 5. 设 A 对称且 $a_{11} \neq 0$, 并假经过一步 *Gauss* 消去之后, A 具有如下形式

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_1^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{0} & A_2 \end{bmatrix}$$

证明 A_2 仍是对称阵.

解. 记矩阵 A 和高斯变换矩阵分别为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_1^{\mathrm{T}} \\ a_1 & A_1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^{\mathrm{T}} \\ l_1 & I \end{bmatrix}$$

则

$$GA = \begin{bmatrix} a_{11} & a_1^{\mathrm{T}} \\ -a_{11}l_1 + a_1 & -l_1 a_1^{\mathrm{T}} + A_1 \end{bmatrix}$$

易知 $-a_{11}l_1 + a_1 = \mathbf{0}$ 以及 $A_2 = -l_1 a_1^{\mathrm{T}} + A_1$。由第一个等式可得 $l_1 = 1/a_{11}a_1$，代入第二个等式知

$$A_2 = -\frac{1}{a_{11}} a_1 a_1^{\mathrm{T}} + A_1.$$

故可知 A_2 仍是对称矩阵。

习题 6. 证明上三角矩阵与上三角矩阵的乘积仍是上三角矩阵。

解. 假设 A, B 为上三角矩阵，且其乘积为 C。下证 C 为上三角矩阵，只需证 $C_{ij}, (i > j)$ 时为 0。易知，

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{n} A_{ik}B_{kj} = \sum_{k=1}^{j} A_{ik}B_{kj} + \sum_{k=j+1}^{n} A_{ik}B_{kj}$$

因为 A, B 为上三角矩阵，所以右边第一项为中 $A_{ik} = 0$，右边第二项中 $B_{kj} = 0$。故得证。

习题 7. 用 *Householder* 方法求矩阵 $A=\begin{bmatrix}1&1\\2&0\\2&1\end{bmatrix}$ 的 QR 分解。

解. 令 $\alpha_1=(1,2,2)^T$，$a_1=\|\alpha_1\|_2=3$，则

$$w_1=\frac{\alpha_1-a_1\boldsymbol{e}_1}{\|\alpha_1-a_1\boldsymbol{e}_1\|_2}=\frac{1}{2\sqrt{3}}(-2,2,2)^T$$

故有

$$H_1=I-2w_1w_1^T=\begin{bmatrix}1/3&2/3&2/3\\2/3&1/3&-2/3\\2/3&-2/3&1/3\end{bmatrix}$$

此时，

$$H_1A=\begin{bmatrix}3&1\\0&0\\0&1\end{bmatrix}$$

再令 $\beta_1=(0,1)^T$，$b_1=\|\beta_1\|_2=1$，则

$$w_2=\frac{\beta_1-b_1\boldsymbol{e}_1}{\|\beta_1-b_1\boldsymbol{e}_1\|_2}=\frac{1}{\sqrt{2}}(-1,1)^T$$

故有

$$\hat{H}_2=I-2w_2w_2^T=\begin{bmatrix}0&1\\1&0\end{bmatrix}$$

记

$$H_2=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{bmatrix}$$

此时

$$H_2H_1A=\begin{bmatrix}3&1\\0&1\\0&0\end{bmatrix}\triangleq R$$

因此，$A=QR$，其中 $Q=H_1^TH_2^T$。